

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE
LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN
CONTRA SOBRETENSIONES EN
ESPAÑA Y POLONIA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD ELECTRICIDAD

AUTOR: Agustín Alcaide Fernández

TUTOR: Esteban Patricio Domínguez González-Seco

Leganés, 13 de octubre de 2010

Agradecimientos

En primer lugar, quería agradecer a Esteban Patricio Domínguez González-Seco la oportunidad que me ha dado al poder realizar este proyecto desde Polonia ya que sin él este proyecto no podría haberse realizado.

A mis padres y hermanos, por el apoyo realizado a lo largo de la carrera.

A mis compañeros de clase, que a lo largo de todos estos años me han ayudado a superar cada momento difícil que se ha presentado (Sergio, Valentín, Álvaro, Juanjo,...).

A todos los profesores que he tenido desde que entré a la universidad, sin ellos no hubiera aprendido todo lo que sé.

A los profesores de la universidad Politechnika Wroclaska de Polonia, los cuales me han ayudado en la consecución de este proyecto.

A mis amigos, que han estado siempre ahí en los momentos duros, ayudándome en todo lo que me hiciera falta (Alberto, Jorge, Patri, Alba,...).

Y a mis compañeros y amigos de Polonia, que me han ayudado durante todo este año a no encontrarme solo en ningún momento.

Muchas gracias a todos.

Índice

1.	Objetivos	4
2.	Conceptos generales	5
2.1	Concepto de sobretensión – Causas	5
2.1.1	Sobretensiones transitorias de origen atmosférico	7
2.1.2	Sobretensiones transitorias de maniobra	21
2.1.3	Sobretensiones transitorias electrostáticas	24
2.2	Protecciones contra sobretensiones transitorias	25
2.2.1	Protecciones primarias	27
2.2.2	Protecciones secundarias	31
2.2.3	Limitadores de sobretensiones transitorias	35
3.	Normativa e instalaciones en España	48
3.1	ITC Nº23 / REBT 2002	48
3.1.1	Objeto y campo de aplicación	48
3.1.2	Categoría de las sobretensiones	49
3.1.3	Medidas para el control de las sobretensiones	50
3.1.4	Selección de los materiales en la instalación	52
3.2	SU8 /CTE – Seguridad frente al riesgo causado por la acción del rayo	52
3.2.1	Procedimiento de verificación	52
3.2.2	Tipo de instalación exigido	55
3.2.3	Anexo B – Características de las instalaciones de protección frente al rayo	55
4.	Normativa e instalaciones en Polonia	62
4.1	PN-IEC 60364-4-443:1999	62
4.2	PN-EN-62305:2006	70
5.	Conclusiones	74
6.	Bibliografía y referencias	76

1. Objetivos

El objetivo del proyecto es hacer una comparativa entre la normativa española y la normativa polaca en lo que se refiere a los sistemas de protección contra sobretensiones transitorias. Es posible la realización de este proyecto gracias a la estancia en Polonia como estudiante Erasmus, y de esta forma poder obtener toda la información relativa a Polonia.

Para ello, el proyecto en sí estará dividido en cuatro partes: conceptos generales, normativa española, normativa polaca y conclusiones.

En la parte de conceptos generales (capítulo 2) encontraremos dos puntos importantes: concepto de sobretensión y sus causas; y elementos en el mercado para proteger estas sobretensiones.

El concepto de sobretensión y sus causas, como es evidente, es el mismo en España y en Polonia, de ahí que sea un concepto general común a los dos países.

En cuanto a los elementos en el mercado para proteger las sobretensiones transitorias, no existen diferencias entre los elementos de protección españoles y los elementos de protección polacos, de ahí que también sea un concepto general común a los dos países.

En el capítulo 3 encontraremos los documentos oficiales españoles referentes a las sobretensiones transitorias.

En la parte de normativa polaca (capítulo 4) encontraremos los documentos oficiales polacos referentes a las sobretensiones transitorias.

Finalmente, desarrollaremos las conclusiones del estudio, donde podremos ver las diferencias entre cada país, y sus posibles causas.

2. Conceptos generales

2.1 Concepto de sobretensión – Causas

Las redes de distribución eléctrica y redes de telecomunicación (redes telefónicas analógicas, digitales, informáticas o de datos), están sometidas continuamente a un número elevado de sobretensiones transitorias.

Una sobretensión es una onda o impulso de tensión que se superpone a la tensión nominal de la red (**Figura 1**), produciendo un gran aumento del valor eficaz de la tensión de la línea durante un período de tiempo muy corto (del orden de μs).

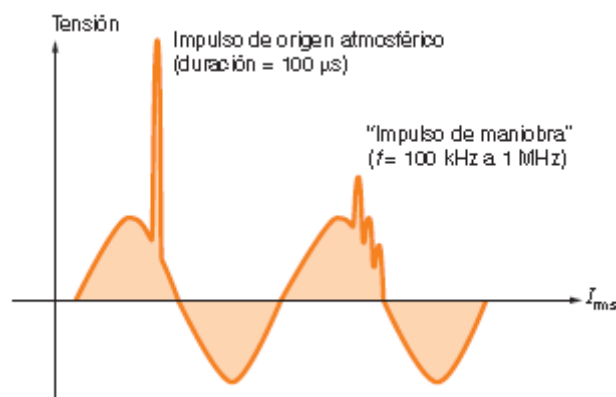


Figura 1. Ejemplo de sobretensión.

Este tipo de sobretensión se caracteriza por lo siguiente (**Figura 2**):

- El tiempo de subida (t_f) se mide en μs .
- El gradiente S se mide en $kA/\mu s$.

Estos dos parámetros afectan al equipo y producen radiaciones electromagnéticas. Además, la duración de la sobretensión (T) produce un aumento de energía en los circuitos eléctricos que puede destruir el equipo.

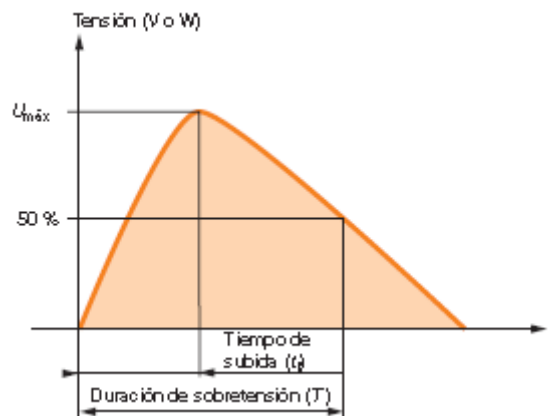


Figura 2. Principales características de la sobretensión.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

Debido a su aleatoriedad y difícil predicción, aparecerán en cualquier momento pudiendo inutilizar alguno de los receptores conectados, que pueden tener elevado valor económico: paralizar la producción de una fábrica con el coste que esto supone, destruir la instalación eléctrica o producir daños en las personas.

Estas sobretensiones transitorias pueden tener tres orígenes bien diferenciados:

- Sobretensiones debidas a descargas atmosféricas.
- Sobretensiones debidas a maniobras en la red.
- Sobretensiones debidas a descargas electrostáticas.

Las **sobretensiones atmosféricas**, como su nombre indica, se deben a la caída directa o indirecta de rayos, uno de los fenómenos más espectaculares y comunes jamás visto. Son menos habituales que las de maniobra (aproximadamente, el 20%), pero mucho más peligrosas, pues poseen valores de cresta mucho más elevados y una alta energía. Y pueden provocar tanto la destrucción de los receptores como el envejecimiento prematuro y el mal funcionamiento de los mismos.

Las **sobretensiones de maniobra** están causadas principalmente por conmutaciones de potencia en las líneas de red, accionamiento de motores, dispositivos de mando, etc. Son las más habituales (el 75-80% de las sobretensiones transitorias). La sobretensión no es muy elevada, de manera que produce en la mayoría de los receptores un envejecimiento prematuro o un mal funcionamiento.

Por último, las **sobretensiones debidas a descargas electrostáticas** (ESD) se producen en un medio seco donde las cargas se acumulan creando un campo electrostático elevado. Estas sobretensiones son especialmente peligrosas para los equipos electrónicos.

La influencia de las sobretensiones transitorias sobre los circuitos electrónicos puede llegar a causar su destrucción en caso extremo, pero también puede provocar fallos de funcionamiento en los receptores y resultar un peligro para las personas.

- **Efectos en las personas**

Debido al efecto de una sobretensión, se puede producir un cebado en el circuito de masas y una subida de potencial. En este caso, el hecho de tocar un objeto conectado a tierra puede constituir un riesgo en el momento preciso en que esta tierra evacua la corriente.

La red de masas de una instalación debe estar unida por una impedancia baja, de manera que se pueda limitar las diferencias de potencial entre los objetos metálicos accesibles simultáneamente por la misma persona.

El riesgo de electrocución de una persona está ligado no a este aumento de tensión de la tierra, sino a la corriente que circula a través de ella. Los principales parámetros que se deben tener en cuenta son:

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- La amplitud y duración de la aplicación de la corriente.
- El trayecto seguido por ésta a través del cuerpo.
- El valor de las impedancias existentes.

Al producirse una sobretensión, puede aparecer un arco eléctrico entre dos piezas conductoras y provocar, por efecto térmico, accidentes corporales. Por otro lado, la explosión de un material también puede provocar accidentes por la dispersión de fragmentos de éste.

- Efectos en los materiales

Cuando una sobretensión aplicada a un material sobrepasa el nivel de aislamiento, podemos tener una destrucción del aislante o de los componentes. Si el material no se destruye, existe un envejecimiento prematuro, sobre todo si las sobretensiones se repiten.

Las sobretensiones pueden provocar disparos intempestivos o problemas con los tiristores, transistores o diodos. Esto puede provocar cortocircuitos dentro de los equipos. Por lo tanto, los componentes pueden resultar dañados, ya sea directamente por la sobretensión, o indirectamente por el cortocircuito. El impacto de esta sobretensión es importante tanto en el ámbito doméstico como en el terciario/industrial.

En los equipos informáticos, se puede crear mal funcionamiento, como paros intempestivos, pérdidas de información o envíos de órdenes erróneas.

2.1.1 Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales más espectaculares y comunes. En los dos siglos transcurridos desde que Benjamin Franklin demostró en 1752 que el rayo era una descarga eléctrica gigantesca, relámpagos, rayos y tormentas han sido objeto de numerosas investigaciones científicas.

Sin embargo, pese a la avalancha de nuevos equipos, los orígenes de las descargas atmosféricas y del mecanismo mediante el cual se electrifican las nubes continúan mostrándose esquivos.

La dificultad reside en la propia física de la descarga y de las tormentas, que abarca una escala de 15 órdenes de magnitud. Desde Franklin, se ha aceptado que el relámpago es el paso de carga eléctrica, positiva o negativa, de una región de la nube a otra y el rayo, el tránsito equivalente de la nube a tierra.

Se estima que en nuestro planeta existen simultáneamente unas 2.000 tormentas y que cerca de 100 rayos descargan sobre la tierra cada segundo. En total, esto representa unas 4.000 tormentas diarias y unos 9 millones de descargas atmosféricas cada día.

Según estudios realizados por el departamento de teledetección del Instituto Nacional de Meteorología (INM) durante el período del 28 de enero de 1992 hasta el 31 de enero de 1995, se observaron 1.615.217 impactos de rayos en España, lo que equivale a una media de 538.405 impactos observados por año.

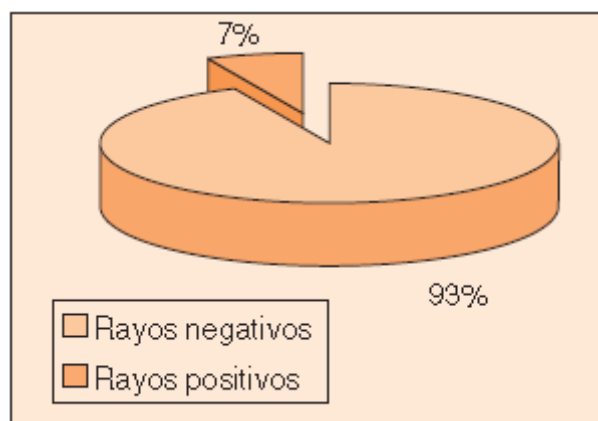


Figura 3. Caídas de rayos en España durante un período de tres años.

La caída de rayos y, por tanto, las sobretensiones transitorias de origen atmosférico representan un serio problema que se debe tener en cuenta.

Las descargas atmosféricas son impredecibles. Diferentes estudios y pruebas de campo permiten conocer algunos datos escalofriantes. Por ejemplo, sabemos que la temperatura máxima de un rayo puede alcanzar valores superiores a 30.000 °C con una duración de una millonésima de segundo. Esta temperatura supera más de cuatro veces la de la superficie del sol.

La longitud de la descarga vertical es normalmente de 5 a 7 km (**Figura 4**), mientras que en una descarga horizontal oscila entre 8 y 16 km. Los valores eléctricos que componen el rayo son enormes y pueden descargar intensidades de 200 kA con una energía total inmensa. La energía media disipada por unidad de longitud del canal de descarga formado por un simple rayo es del orden de 10^5 J/m, lo que equivale a unos 100 kg de dinamita. La energía media total por descarga es de 3×10^8 J y su duración total se considera que es de aproximadamente 30 ms. Así, la potencia media por rayo es de unos 10^{13} W. Cada rayo, en promedio, consta de 4 descargas separadas de 40 ms.



Figura 4. Descargas verticales (rayos).

Considerando la energía y las 100 descargas/segundo que caen, la energía eléctrica global total disipada en un año es de aproximadamente 10^9 kW/h, lo que equivale a 1/117 parte de la producción eléctrica española de 1988.

- Principio de una descarga

Una porción de la energía de una descarga atmosférica se disipa en forma acústica (trueno) y otra mucho mayor (75%) se disipa en forma de calor, alcanzando una temperatura en el canal de descarga de 15.000 a 30.000 °C y, como consecuencia, la presión de los gases puede llegar a unas 100 atmósferas.

Para explicar el principio de una descarga, se ha tomado como ejemplo un rayo negativo descendente, pues es el más común en España.

El fenómeno de descarga puede explicarse según 4 fases (**Figura 5**):

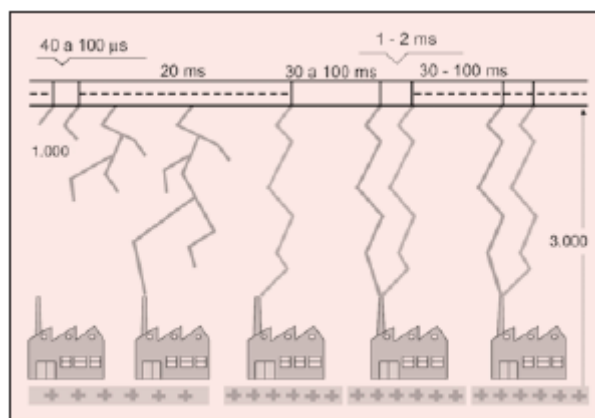


Figura 5. Etapas de una descarga.

1. El rayo comienza por un trazo que se desarrolla a partir de una nube y progresa bandeando sucesivamente de 30 a 50 m del suelo. El trazo está compuesto de partículas

eléctricas arrancadas de la nube por el campo eléctrico creado entre éste y el suelo. Éstas forman un canal luminoso que se dirige hacia el suelo.

2. Se crea un canal ionizado que se va ramificando, y llega a 300 m del suelo. El efluvio eléctrico (o canal de chispas) sale desde el suelo y alguna chispa entra en contacto con el elemento.

3. Aparece en este momento un arco eléctrico muy luminoso que provoca el trueno (el trueno es el sonido de la explosión a lo largo de todo el canal de descarga y su larga duración en comparación con el rayo se debe a las numerosas reflexiones del sonido) y que permite el intercambio de carga del condensador equivalente a efectos eléctricos nube-suelo.

El rayo principal parte desde el suelo hasta la nube con una velocidad de propagación cercana a $1/3$ de la de la luz. Este arco de retorno se caracteriza por ser un impulso de duración total cercana a los 100 μs y un frente creciente de 1 a 15 μs .

4. Después aparece una sucesión de arcos llamados arcos subsiguientes. Entre estos arcos, subsiste un trazo continuo que hace circular una corriente del orden de 200 A, forzando así la descarga de una parte importante de las cargas del condensador.

Sin embargo, estos arcos poseen una variación de intensidad muy fuerte (di/dt) que provocan fenómenos muy peligrosos de inducción, mientras que el primer arco provoca problemas principalmente térmicos.

La potencia desencadenada crece aproximadamente con la quinta potencia del tamaño de la nube: duplicar las dimensiones de la nube implicaría multiplicar la potencia por 2^5 .

Las grandes tormentas pueden llegar a producir rayos a razón de más de 100 descargas por minuto. Este tipo de descargas pueden ser de cuatro tipos diferentes:

■ **Clasificación de los rayos (según K. Berger)**

Los rayos se clasifican según el sentido de su desplazamiento y la polaridad de la nube que se descarga.

✓ Según la polaridad de la nube:

– Rayo negativo: cuando la nube está cargada negativamente y la tierra, positivamente. Los rayos negativos son muy frecuentes en lugares en los que el terreno es llano y el clima templado. Aproximadamente, el 90% de los rayos son negativos.

– Rayo positivo: cuando la nube está cargada positivamente y la tierra, negativamente. Estos rayos son muy extraños y peligrosos.

✓ Según el sentido de desplazamiento:

– Rayo descendente: cuando el rayo se dirige de la nube al suelo. Este tipo de rayo es muy frecuente en climas cálidos y donde el terreno es muy llano.

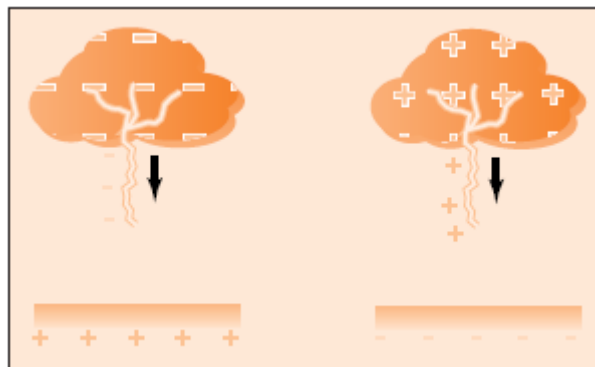


Figura 6. Rayo negativo y positivo descendente.

– Rayo ascendente: cuando el rayo se dirige desde el suelo hasta la nube. Este tipo de rayo, mucho más destructivo que el anterior, se crea, especialmente, en lugares montañosos o donde existen prominencias importantes.

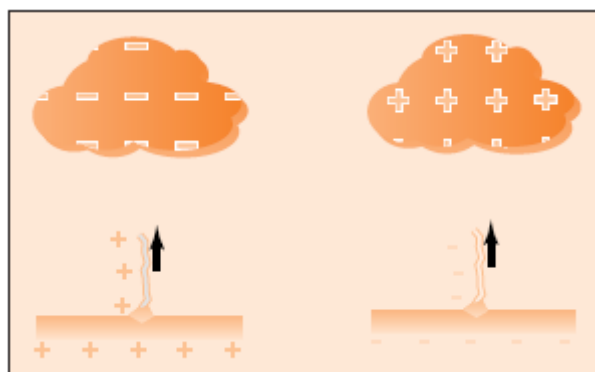


Figura 7. Rayo positivo y negativo ascendente.

Existen, por lo tanto, cuatro combinaciones posibles de rayos:

- Rayo negativo descendente (**Figura 6**).
- Rayo negativo ascendente (**Figura 7**).
- Rayo positivo descendente (**Figura 6**).
- Rayo positivo ascendente (**Figura 7**).

De estos cuatro tipos, los más comunes y menos peligrosos serían los negativos descendentes (suponen el 95% de los rayos).

Los menos comunes (menos del 1% de los rayos), pero más peligrosos, son los positivos ascendentes.

▪ Parámetros característicos de los rayos

Los parámetros más importantes a la hora de estudiar el efecto del rayo son los siguientes:

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- \hat{I}_{pico} : intensidad de pico para calcular el incremento de potencial de tierra.
- $(di/dt)_{\text{máx}}$: frente de subida para calcular las tensiones inducidas y las caídas de tensión a través de las inductancias, así como el espectro de frecuencias de la perturbación.
- i^2dt : parámetro de energía proporcional útil para calcular los efectos dinámicos (fuerzas resultantes).
- idt : carga eléctrica útil para calcular la volatilización de materia en el punto de impacto de la caída del rayo.

Para tener una guía de diseño, se establecen cuatro tipos de rayo correspondientes a las columnas 90, 50 y 10%, y máximo observado (bajo, típico, alto y extremo) (**Tabla 1**).

Tanto la proporción como la intensidad de los rayos aumentan con la latitud geográfica. Los valores más altos se registran en la proximidad de los sistemas montañosos, los cuales favorecen la formación de tormentas de masa de aire al inducir ascensos forzados.

Parámetro	90% (bajo)	50% (típico)	10% (alto)	Máximo observado (extremo)
Corriente de pico	2 a 8 kA	10 a 25 kA	40 a 60 kA	230 kA
Velocidad de ascenso de la corriente (di/dt)	2 kA/ μ s	8 kA/ μ s	25 kA/ μ s	50 kA/ μ s
Duración total del rayo	0,01 a 0,1 s	0,1 a 0,3 s	0,5 a 0,7 s	1,5 s
Duración de un simple impulso o descarga	0,1 a 0,6 ms	0,5 a 3 ms	20 a 100 ms	400 ms
Intervalo de tiempo entre impulsos	5 a 10 ms	30 a 40 ms	80 a 130 ms	500 ms
Intervalo de tiempo entre el principio y la mitad del valor de pico en el lado de caída	10 a 25 μ s	28 a 42 μ s	52 a 100 μ s	Más de 120 μ s
Tiempo hasta el valor de pico	0,3 a 2 μ s	1 a 4 μ s	5 a 7 μ s	10 μ s
Número de impulsos o descargas en un rayo individual	1 a 2	2 a 4	5 a 11	34

Tabla 1. Parámetros característicos de cuatro tipos de rayo tipificados.

En el litoral mediterráneo, la presencia de un mar caliente y cadenas montañosas próximas a la costa ayuda al desarrollo de fenómenos convectivos.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

En las zonas llanas, el número de días de tormenta es menor que en zonas próximas con más accidentes geográficos.

En el litoral andaluz, el viento procedente de África, muy seco, y la escasez de bosques y vegetación dificultan la formación de tormentas (**Tabla 2**).

	Rayo negativo	Rayo positivo
Marítima	31 kA	53-61 kA
Litoral		47 kA
Mesetaria	23 kA	54 kA
Montañosa		57 kA

Tabla 2. Intensidad media de descarga de los rayos en función de la zona geográfica.

○ Principales efectos de los rayos

La corriente de rayo es una corriente eléctrica de alta frecuencia, del orden de 1 MHz. Además de los efectos de inducción y de sobretensiones importantes, provoca los mismos efectos que toda corriente de alta frecuencia cuando circula por un conductor.

- **Efectos térmicos:** fusión en los puntos de impacto del rayo y efecto Joule debido a la circulación de corriente, pudiendo provocar incendios.
- **Efectos electrodinámicos:** las corrientes de rayo circulan por los conductores paralelos creando unas fuerzas de atracción o repulsión entre los cables y provocando roturas o deformaciones mecánicas (cables aplastados).
- **Efectos de deflagración:** el canal de rayo provoca una dilatación del aire y una compresión hasta unos 10 m de distancia. Un efecto de onda de choque rompe los vidrios y tabiques, y puede proyectar a personas o animales a algunos metros de distancia. Esta onda se transforma al mismo tiempo en onda sonora: trueno.
- **Las sobretensiones conducidas** por un impacto sobre las líneas aéreas de alimentación eléctrica, telefónica o de datos.
- **Las sobretensiones inducidas** por el efecto de la radiación electromagnética del canal de rayo.
- **La elevación de potencial de la tierra** debida a la corriente de rayo en el suelo.

○ Tipos de sobretensiones transitorias atmosféricas

Las líneas aéreas, los cables suspendidos y los enterrados, pueden resultar dañados directamente por los rayos o recibir una influencia eléctrica de mayor o menor grado de

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

las descargas atmosféricas próximas. Se distinguen tres tipos de sobretensiones atmosféricas en función de la caída del rayo:

- **Sobretensiones transitorias conducidas (Figura 8)**

La caída de un rayo directo sobre una línea de distribución de energía o de comunicaciones (línea telefónica) crea una onda de corriente que se propaga por ambas partes del punto de impacto. Esta sobretensión, que puede propagarse varios kilómetros, acabará llegando a los equipos del usuario y derivándose a tierra por medio de estos equipos, a los que producirá averías o su destrucción.

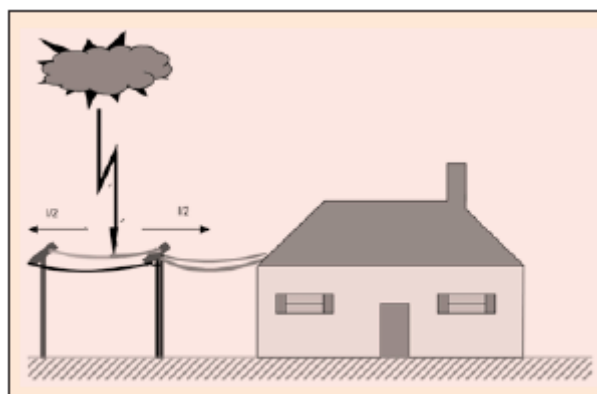


Figura 8. Sobretensiones transitorias conducidas.

- **Sobretensiones transitorias inducidas (Figura 9)**

La caída de un rayo sobre un poste, árbol o irregularidad en el terreno será equivalente a una antena de gran longitud que emite un campo electromagnético muy elevado. La radiación emitida (tan importante como el frente creciente de corriente radiado, de 50 a 100 kA/ μ s) induce corrientes transitorias en las líneas eléctricas o telefónicas, transmitiéndolas al interior de la instalación y provocando averías o la destrucción de los equipos conectados.

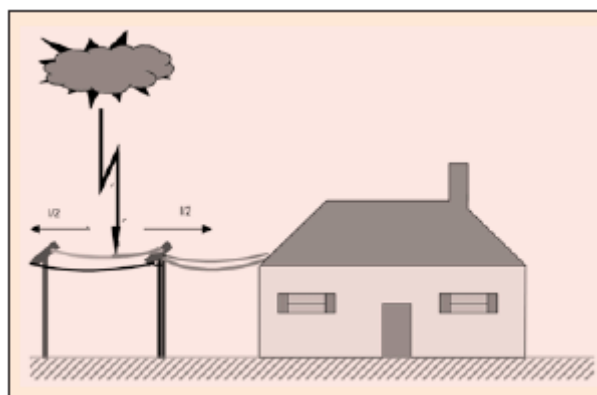


Figura 9. Sobretensiones transitorias inducidas

- **Sobretensiones transitorias debidas al aumento de potencial de tierra (Figura 10)**

La caída de un rayo sobre el terreno o en un pararrayos provoca una fuerte elevación del potencial de tierra en una zona de algunos kilómetros (si el rayo cae en un pararrayos, el potencial de tierra aumentará cuando éste dirija la corriente a tierra). Este aumento de potencial puede inducir sobretensiones elevadas en los cables subterráneos y provocar la elevación de la tensión de las conexiones a tierra.

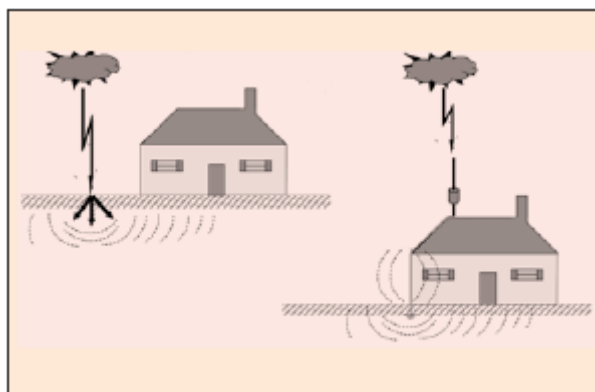


Figura 10. Sobretensiones transitorias debidas al aumento del potencial de la tierra.

Dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos, la corriente de descarga se distribuye por debajo de la superficie de la tierra en todas las direcciones, con zonas de alta conductividad que toman una mayor parte de la corriente y la transportan a largas distancias, hasta que se establece el equilibrio de potencial final en el suelo situado por debajo de la nube.

El efecto de protección de tierra depende, en gran parte, de la conductividad del suelo, pues cuanta mayor conductividad, menor sobretensión en el suelo.

- Consecuencias de las sobretensiones transitorias atmosféricas

Las consecuencias principales de las sobretensiones atmosféricas vienen dadas por el acoplamiento de corrientes punta en los cables de señales.

- **Acoplamiento del campo al cable. Tensiones inducidas**

El campo electromagnético generado durante la caída de un rayo se acopla a todos los cables suficientemente cercanos generando sobretensiones de modo común o diferencial, que se propagan rápidamente (**Figura 11**).

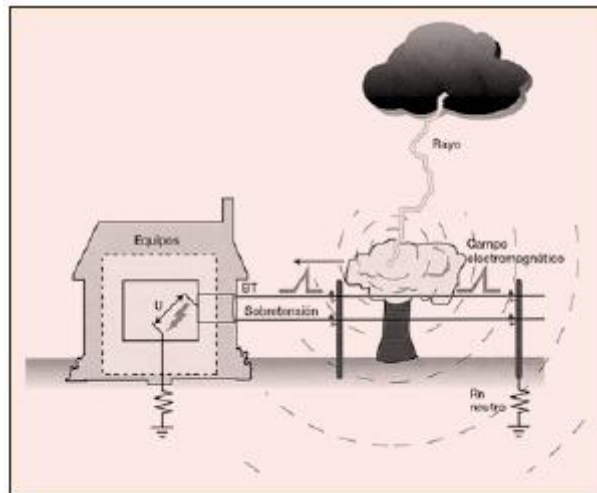


Figura 11. Acoplamiento del campo al cable.

- **Acoplamiento de cable a cable**

A continuación, vamos a mostrar, con ayuda de algunos ejemplos, la forma en la que las corrientes de punta pueden acoplarse, óhmica, inductiva y capacitivamente, en los cables de señales de instalaciones muy extensas.

Se partirá de la disposición en la que un aparato 1 está situado en un edificio 1 y un aparato 2, en otro edificio 2, de manera que estén conectados ambos aparatos entre sí por medio de un cable de señales.

Además, ambos aparatos se encuentran conectados a la correspondiente barra colectora de compensación de potencia (PAS), por ejemplo, a través del conductor de protección PE, en los dos edificios.

- ✓ **Acoplamiento óhmico (Figura 12)**

Al producirse una descarga de un rayo en el edificio 1, en la resistencia óhmica de propagación R_{A1} tiene lugar una elevación de tensión de algunos centenares de kV.

Debido a estas altas tensiones, pueden perforarse los aislamientos de los receptores 1 y 2, de manera que después puede fluir una corriente de punta óhmica acoplada desde el PAS 1 a través del aparato 1, el cable de señales, el aparato 2 y el PAS 2, y la resistencia R_{A2} .

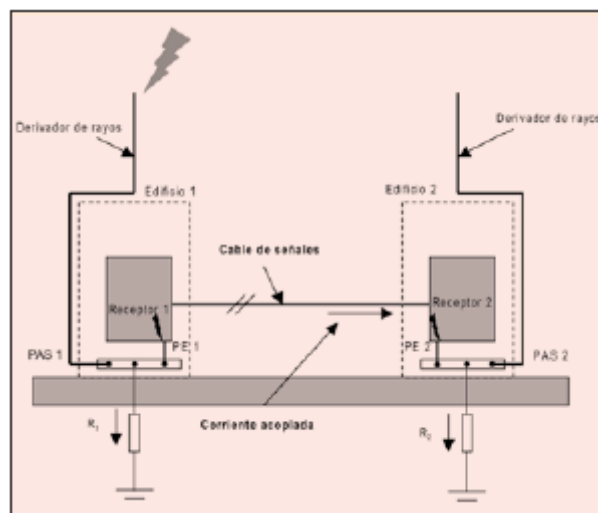


Figura 12. Acoplamiento óhmico.

La magnitud de corriente de punta acoplada (valor de cresta de la corriente de algunos kA) se determina por la relación entre las resistencias óhmicas R_{A1} y R_{A2} .

✓ Acoplamiento inductivo (**Figura 13 y Figura 14**)

Los campos magnéticos que se forman partiendo del canal del rayo o de los conductores recorridos por la corriente de rayo, inducen tensiones en los bucles metálicos.

Se observan dos fenómenos inductivos en las instalaciones:

- Bucle de inducción entre conductores de un cable de señales (**Figura 13**).

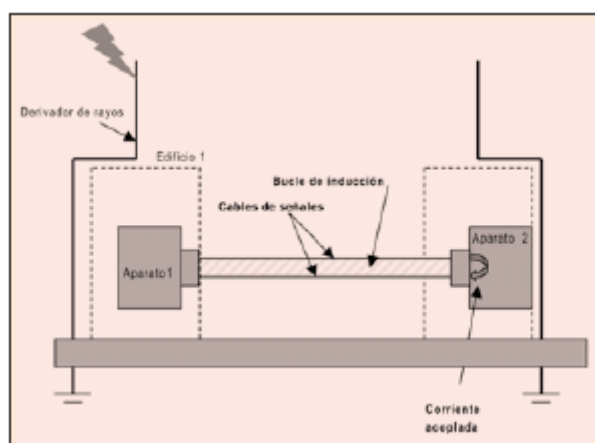


Figura 13. Bucle de inducción entre conductores de un cable de señales.

Un cable de señales de dos hilos que une el aparato 1 con el aparato 2 forma un bucle de inducción en el cual, al descargar un rayo en el edificio 1 con su derivación a tierra por el pararrayos, se induce una tensión característica, denominada *tensión transversal* (expresada en kV), la cual tiene como consecuencia una corriente acoplada de hasta algunos kA.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

Estas tensiones y corrientes suponen una carga excesiva para los componentes de las entradas o salidas de los receptores.

– Bucle de inducción entre cable de señal y tierra (**Figura 14**).

El bucle se crea entre el cable de señal y la tierra a la que están conectados los receptores.

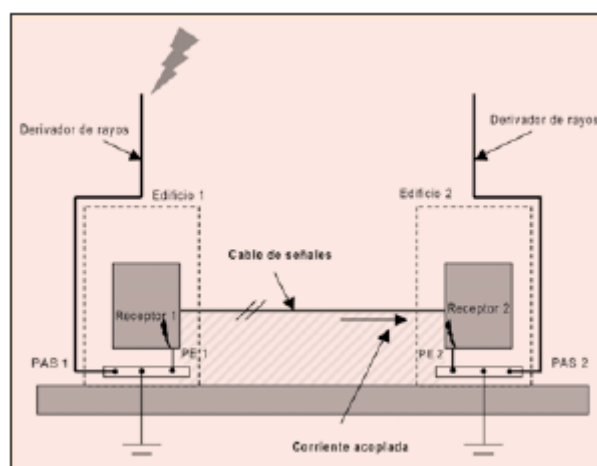


Figura14. Bucle de inducción entre cable de señal y tierra.

Al descargar un rayo en un edificio, se induce en el bucle una sobretensión (de algunas decenas de kV) que provoca una perforación en los aislamientos de los receptores y una corriente acoplada de algunos kA.

✓ Acoplamiento capacitivo (**Figura 15**)

Cuando descarga un rayo sobre la tierra o sobre un pararrayos, el canal del rayo o el derivador de rayos, como consecuencia de la caída de tensión en la resistencia de propagación R_A , experimenta una elevación de tensión de algunos cientos de kV frente al entorno.

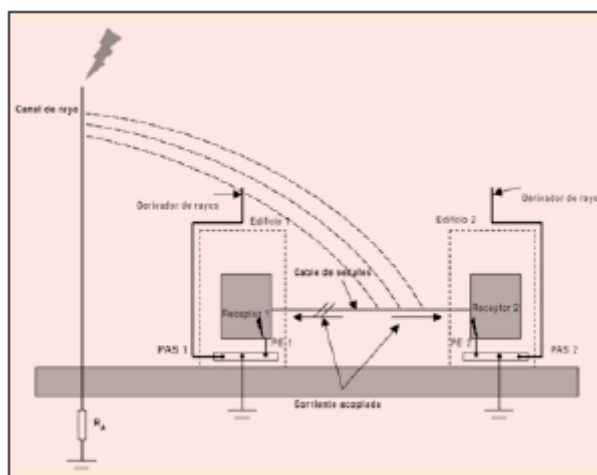


Figura 15. Acoplamiento capacitivo.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

El cable de señales entre los dos aparatos está acoplado capacitivamente con uno de esos canales de rayo o con el pararrayos.

Las capacidades de acoplamiento (condensadores) se cargan y dan lugar a una corriente acoplada de algunas decenas de A, la cual tras producir perforaciones de los receptores, fluye finalmente a tierra.

- Conclusiones

Los elevadísimos valores de las sobretensiones originadas por las descargas de rayos (directas o indirectas), deberán reducirse a valores tolerables, claramente por debajo de las tensiones de descarga o de perforación, mediante el empleo de los adecuados aparatos de protección contra sobretensiones. Si se tratara de conseguir una protección, incluso en el caso de descarga directa de rayo, los aparatos de protección empleados deberían estar en condiciones de derivar, sin destruirse, elevadas corrientes parciales de rayo.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

Listado de lugares expuestos a los rayos

Tipo de estructura	Efectos del rayo
Vivienda individual	Perforación de las instalaciones eléctricas, incendios y degradación material. Degradaciones limitadas normalmente a los objetos que se encuentran en el punto de impacto del rayo o en la trayectoria del mismo.
Inmueble de vivienda colectiva	Deterioro de las instalaciones colectivas: eléctricas, antenas de TV, detección de incendios y control de accesos. Riesgo de incendio en los locales técnicos comunes y protecciones técnicas (distribución de energía y redes de comunicación). Parada de las instalaciones: ascensor, climatización, VMC.
Edificio agrícola	Riesgo principal de incendio y saltos de tensión peligrosos. Riesgo secundario debido a la pérdida de energía eléctrica con riesgo de muerte para el ganado, como resultado de una avería del sistema de control electrónico de las instalaciones de ventilación, alimentación de nutrición...
Teatros, colegios, grandes almacenes, instalaciones deportivas	Degradaciones en las instalaciones eléctricas (p. ej. las de alumbrado público); que conllevan probablemente un efecto de pánico. Avería de los sistemas contra incendios que conllevan retraso a la hora de reaccionar.
Bancos, compañías de seguros, sociedades mercantiles	Además de los problemas antes mencionados: problemas relativos a la pérdida de comunicación, averías en los ordenadores y pérdida de datos.
Hospitales, guarderías, establecimientos penitenciarios, residencias de la tercera edad	Además de los problemas antes mencionados: problemas que afectan a los pacientes de cuidados intensivos y dificultades para socorrer a las personas inmovilizadas.
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de legado cultural irremplazable.
Industria manufacturera	Efectos adicionales en función del contenido de las fábricas: desde la degradación leve hasta los daños inaceptables con pérdida de producción.
Refinerías, gasolineras, fábricas de fuegos artificiales, fábricas de munición	Riesgo de incendio directo o indirecto, de explosión en edificios o cubas de almacenamiento. Riesgo de contaminación por los suelos y consecuencias económicas para la unidad de producción.
Fábricas químicas, bioquímicas y laboratorios	Incendios y funcionamiento defectuoso de las instalaciones, además de consecuencias nocivas para el entorno local y global. Riesgo de contaminación por los suelos y consecuencias económicas para la unidad de producción.
Centrales nucleares	Interrupción de la producción y distribución de energía a los usuarios.

2.1.2 Sobretensiones transitorias de maniobra

Para realizar la desconexión o el corte de una corriente eléctrica, basta con que la resistencia del aparato de corte suba desde un valor nulo antes del corte a un valor casi infinito después del corte.

Para que la energía disipada en el aparato por el corte sea débil, es necesario que:

- La variación de resistencia sea lo más rápida posible.
- El corte tenga lugar lo más cerca posible del paso por cero natural de la corriente.

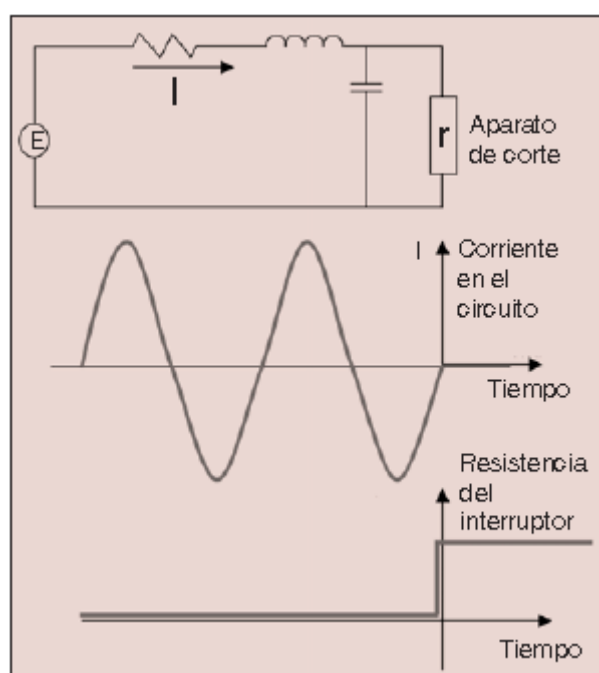


Figura 16. Interruptor ideal.

En la figura adjunta (**Figura 16**), se muestra un aparato de corte ideal con una resistencia nula hasta el instante preciso del paso por cero, e infinita inmediatamente después.

Este tipo de aparato es imposible de realizar en la realidad, pero es posible acercarse al sistema ideal utilizando las propiedades del arco eléctrico.

En los aparatos de corte, este arco eléctrico se produce en un medio aislante llamado dieléctrico (gas, aceite y actualmente hexafluoruro de azufre SF_6).

Desde que se interrumpe un circuito, atravesado por una corriente débil, se produce inevitablemente un arco eléctrico. Este arco es conductor debido al fenómeno de ionización que se produce en su trayecto.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

Además, posee la característica de pasar del estado conductor al aislante en el instante más adecuado, es decir, cuando nos acercamos al paso por cero de la corriente.

- Criterios del buen funcionamiento de un buen aparato de corte

Un aparato que realice una buena desconexión debe cumplir las siguientes condiciones:

- Soportar la energía disipada por el corte sin destruirse.
- El enfriamiento del gas ionizado debe ser suficiente para evitar que la ionización se mantenga.
- El aislante entre los polos del aparato, que varía de cero a un valor muy grande en el momento del corte, tiene que ser suficiente para evitar un cebado del arco por la tensión transitoria de restablecimiento.

Tensión transitoria de restablecimiento

Cuando el aparato de corte esté cerrado, la tensión entre los polos de una misma fase es nula.

Desde que los polos comienzan a separarse, una tensión aparece entre ellos. Cuando el corte tiene fin, la tensión tendrá el valor de la tensión de la red.

Entre estos dos valores, sigue un régimen transitorio a frecuencia elevada. El valor máximo, la frecuencia y el tiempo de sobretensión dependen de las características de la red.

En AT, la velocidad de crecimiento de la tensión puede llegar a algunos kilovoltios por microsegundo y la frecuencia a algunos kilohertz.

- Sobretensiones transitorias de maniobra en alta tensión

Las sobretensiones de maniobra pueden ser originadas por procesos de conmutación. En instalaciones de alta tensión pueden actuar mediante acoplamiento capacitivo (también sobre las instalaciones de baja tensión), produciendo en casos especiales sobretensiones de más de 15 kV.

Las sobretensiones de conmutación en alta tensión pueden producirse a causa de:

- **Desconexión de una línea de alta tensión que funcionaba sin carga**

En el estado inicial, la capacidad de la línea se encuentra cargada a un valor de tensión característica de la red.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

En el momento de abrir el interruptor se produce una diferencia de tensión entre la red y la línea desconectada que puede desembocar en la aparición de un arco inverso entre los contactos del dispositivo de desconexión si no estuvieran lo suficientemente alejados el uno del otro. Este fenómeno tiene una duración de algunos milisegundos y puede repetirse varias veces a causa del ajuste del valor de la tensión de red.

Se observa una oscilación amortiguada de algunos cientos de kHz, que tiene una amplitud máxima equivalente a la diferencia de tensión entre los contactos en el momento de la aparición del arco inverso, y puede llegar a ser mucho mayor que el valor eficaz de la tensión de red.

▪ **Desconexión de un transformador de marcha en vacío**

Un transformador, además de su inductividad, tiene también una capacidad de bobinado.

Al desconectar un transformador que trabaja en vacío, esta capacidad se debe cargar utilizando la energía donada por el campo magnético.

El circuito formado por la inductancia y la capacidad continúa oscilando hasta que la totalidad de la energía en la resistencia óhmica de este circuito se haya transformado en calor por efecto Joule.

Las sobretensiones de este tipo pueden llegar a presentar, al igual que en el caso anterior, valores de amplitud que superan en mucho los de la tensión de red.

▪ **Derivación a tierra en redes aisladas de tierra**

Si en el conductor exterior de una red no puesta rígidamente a tierra se produce una derivación a tierra, el potencial de la totalidad del sistema de conductores se altera con el valor de la tensión de tierra-conductor del conductor afectado.

Si se produce el arco voltaico, tendrán lugar los mismos procesos que en el caso de desconexión de un condensador, y surgirán sobretensiones de conmutación en forma de una oscilación atenuada.

Además de estas sobretensiones de conmutación en el lado de la alta tensión, que repercuten capacitivamente sobre las instalaciones de baja tensión, las variaciones repentinas de la intensidad producidas en instalaciones de alta tensión pueden dar lugar en instalaciones de baja tensión a sobretensiones, a causa de acoplamientos inductivos.

Estas alteraciones de intensidad pueden originarse por:

- ✓ Conexión o desconexión de una carga grande.
- ✓ Presencia de un cortocircuito, de un cortocircuito de derivación a tierra o de una doble derivación a tierra.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- ✓ Supresión de un cortocircuito, de un cortocircuito de derivación a tierra o de una doble derivación a tierra.

Mediciones efectuadas en conductores de baja tensión dentro de instalaciones de alta tensión han demostrado que, en caso de procesos de conmutación en el lado de la alta tensión, se pueden presentar sobretensiones con valores punta superiores a 15 kV.

- Sobretensiones transitorias de maniobra en baja tensión

Las sobretensiones que se producen en las líneas de baja tensión por maniobra son principalmente: la desconexión de cargas inductivas, la desconexión de las inductancias en la rama serie del circuito de corriente y los disparos de los elementos de protección.

- **Desconexión de cargas inductivas**

Desconexión de cargas inductivas conectadas en paralelo a la fuente de tensión como, por ejemplo, transformadores, bobinas de reactancias, bobinas de relés o contactores.

Las sobretensiones de conmutación que aparecen se producen por un funcionamiento similar al comentado anteriormente en el caso de desconexión de un transformador de alta tensión de funcionamiento en vacío.

- **Desconexión de inductancias en la rama serie del circuito de corriente**

Este fenómeno aparece al utilizarse inductancias, como bobinas longitudinales, bucles de conductores e inductancias del conductor, que pretenden mantener el flujo de la corriente incluso en caso de interrupción del circuito.

La amplitud de la sobretensión depende principalmente de la corriente que circula por esta inductancia justo en el momento de producirse la desconexión.

2.1.3 Sobretensiones transitorias electrostáticas

- **Carga electrostática**

El frotamiento de dos materiales diferentes provoca el acercamiento de electrones sobre los átomos cercanos al punto de contacto. Si los materiales son conductores, los electrones circularán libremente al interior de los cuerpos en contacto combinándose con las cargas positivas (esta combinación es a veces imposible, como en el caso de materiales aislantes, o cuando las masas metálicas están aisladas de todo circuito de tierra o de retorno). Existirá, por lo tanto, una acumulación de cargas negativas en un cuerpo y de positivas sobre el otro en el momento de la separación. Este fenómeno, al ser acumulativo, puede provocar la constitución de cargas electrostáticas de valores importantes.

Por ejemplo, una persona que camina sobre una moqueta sintética acumulará cargas que pueden llegar a un potencial de 10 kV.

- **Efectos de las descargas electrostáticas**

Cuando dos materiales cargados a potenciales electrostáticos diferentes se pongan en contacto, existirá una combinación de las cargas que producirá una corriente de intensidad I_{DES} que dependerá de las características óhmicas de los cuerpos presentes. Este fenómeno tiene el nombre de **descarga electrostática**.

Las corrientes de descarga son en general muy violentas y poseen una característica impulsional. Estamos hablando de impulsos de corrientes con una forma de onda similar a la que aparece en la figura (tiempo de ascenso $T_m = 5$ ns y tiempo de descenso igual a 30 ns). Esta forma de onda es la de la norma IEC 62305. Estas descargas se inician, generalmente, en un medio dieléctrico, por ejemplo, el aire, o a través de componentes que pueden ser destruidos por sobreintensidades. Los efectos pueden ser también indirectos, debido a la conducción de un pico de tensión a través de la línea de masas.

Este fenómeno es muy peligroso en el caso de sistemas electrónicos. La presencia de descargas electrostáticas puede dejar fuera de servicio un ordenador, sea cual sea su potencia. En efecto, la emisión del campo magnético H creado por la corriente de descarga electrostática I_{DES} provoca la aparición de tensiones en modo común en los aparatos mal protegidos.

- **Identificación del fenómeno**

La aparición de defectos inexplicables como parada de materiales, destrucciones de componentes en un ambiente seco y en presencia de numerosos materiales aislantes, hace pensar en posibles descargas electrostáticas. Estos fenómenos son aleatorios y se deberán, en su mayor parte, a una causa exterior al circuito afectado. Su detección necesitará el manejo de osciloscopios con una banda pasante elevada, es decir, que pueda medir frecuencias muy elevadas.

2.2 Protecciones contra sobretensiones transitorias

Se dispone de poca información respecto a la estabilidad de los componentes en el momento en el que soportan sobretensiones. Sin embargo, se conoce, generalmente, que la mayoría de los dispositivos de estado sólido no deben de estar sometidos a sobretensiones, aunque sean de corta duración, si éstas exceden incluso ligeramente los picos de sobretensión que se presentan durante el funcionamiento normal del equipo. Como se ha comentado anteriormente, las consecuencias finales en los receptores de las sobretensiones transitorias son el deterioro y la destrucción de los materiales, el mal funcionamiento de los equipos (perturbaciones informáticas, arranque de motores cuando no deben o disparo de una alarma) y, finalmente, el envejecimiento prematuro de los receptores.

En la **Tabla 3** se comparan varios componentes en cuanto a su posible destrucción a causa de las sobretensiones y en función de la energía de las mismas.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

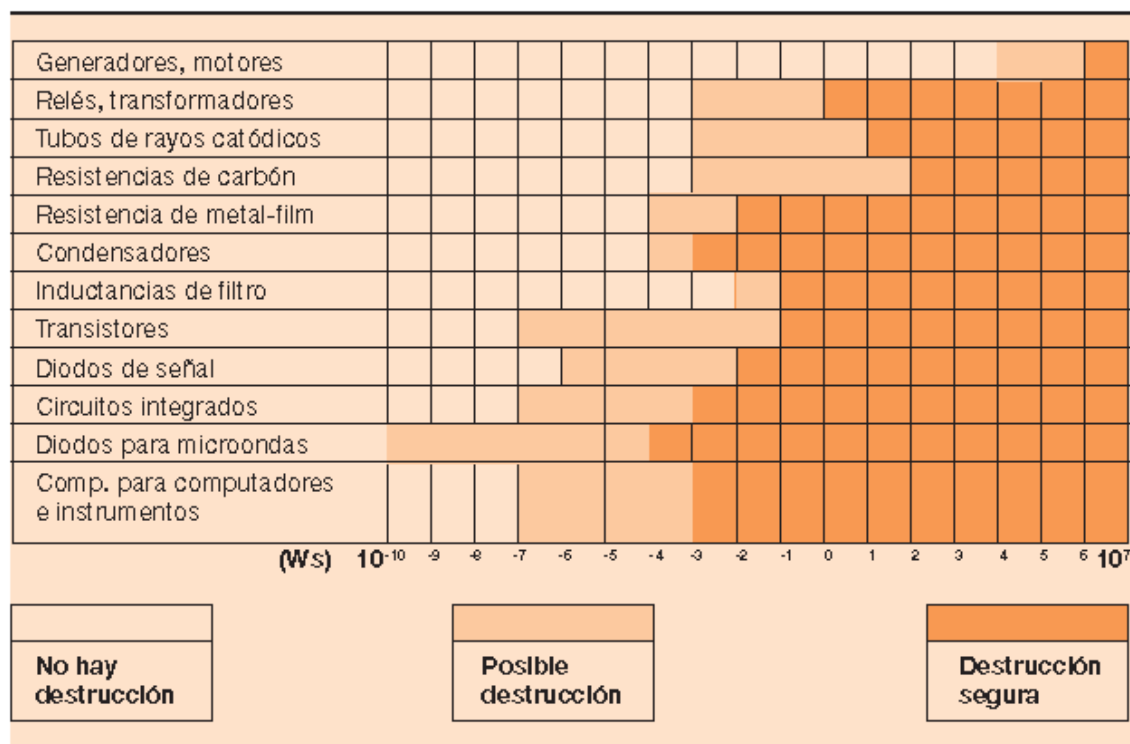


Tabla 3. Efectos de las sobretensiones transitorias sobre equipos y componentes en función de la energía de dichas sobretensiones.

Estas sobretensiones pueden ser, además, peligrosas para las personas, ya sea de manera indirecta a partir de los materiales afectados (el mal funcionamiento o la destrucción de un equipo puede convertirse en un peligro para una persona: muerte por un incendio provocado por la caída de un rayo, aparatos enchufados a la red, etc.) o de manera directa (caída directa de un rayo, muerte por la caída de un rayo en la línea telefónica cuando una persona usaba el teléfono, etc.).

Por lo tanto, para garantizar la seguridad de las personas, la protección de los bienes y, en cierta medida, la continuidad de servicio, la coordinación del aislamiento busca reducir la probabilidad de fallo dieléctrico del material.

Existen varios componentes encargados de limitar o suprimir las sobretensiones definidas anteriormente. Estos dispositivos utilizados en la fabricación de aparatos de protección contra las sobretensiones están ya muchas veces incluidos en ciertos aparatos de BT, especialmente, en los aparatos electrónicos.

Estudiar la coordinación del aislamiento de una instalación eléctrica consiste en definir, a partir de los niveles de tensiones susceptibles de presentarse en esta instalación, uno o más niveles de protección contra las sobretensiones transitorias.

El nivel de protección se deduce de las condiciones:

- De la instalación.
- Del ambiente.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

– De la utilización del material.

El estudio de estas condiciones permite determinar el nivel de sobretensión que podrá solicitar el material durante su utilización. La elección del nivel de aislamiento adoptado permitirá asegurar que, frente a los choques de maniobra, al menos el nivel de aislamiento no será nunca sobrepasado.

Frente a la caída del rayo, un compromiso deberá, generalmente, realizarse entre el nivel de protección y el riesgo de fallo admisible.

Se puede establecer una clasificación de tres niveles de protección contra los efectos de los rayos, tanto directos como indirectos, los efectos de las sobretensiones de maniobra y las descargas electrostáticas:

- El nivel primario está constituido por los sistemas de pararrayos, terminales aéreos, estructuras metálicas, blindajes y tomas de tierra, y sería el encargado de captar el rayo, derivarlo y dispersarlo a tierra.
- El nivel secundario sería el necesario para la alimentación del equipo o sistema: en él se limitan las sobretensiones debidas a la caída indirecta de un rayo, a sobretensiones de maniobra o a descargas electrostáticas.
- El nivel terciario se relaciona con las líneas de datos y transmisión, tarjetas de circuito impreso y componentes electrónicos, llamados también *protección fina*.

2.2.1 Protecciones primarias

Las protecciones primarias pretenden proteger los lugares de las caídas directas de rayos permitiendo una captación y circulación de la corriente de rayo hacia el suelo.

Una instalación de este tipo se compone de una línea de captación o terminal aéreo, unas líneas bajantes o derivadores y una red densa de toma de tierra o, en su defecto, picas de profundidad de 9 m como mínimo en cada derivador, de manera que el rayo pueda derivarse al subsuelo sin problemas.

El principio se basa en una zona de protección determinada por una estructura más elevada que el resto.

Existen tres grandes tipos de protección primaria:

- Los pararrayos: protección primaria más antigua y común.
- Los tendidos aéreos.
- La caja mallada de Faraday.

- **Pararrayos (Figura 17 y Figura 18)**

Los pararrayos son la forma más conocida de protección primaria contra rayos y son utilizados en edificios rurales y lugares donde la protección es obligatoria, como tanques de almacenamiento de combustibles y almacenes de explosivos.

Además, deberían utilizarse si el edificio alberga un número elevado de personas, o materiales, instalaciones y equipos sensibles; si la altura de dicho edificio supera los 43 m, o si el índice de riesgo (determinado por los días/año que hay tormentas en la zona donde está ubicado, las características orográficas del terreno y el tipo de edificio) supera los 27 puntos.



Figura 17. Pararrayos en una instalación.

La dirección del rayo no está influida por los objetos de la tierra hasta que no alcanza una distancia de unos 10 a 100 m del objeto.

El pararrayos proporciona un circuito de menor resistencia. Así, se establece el segmento final del camino de descarga de nube a tierra. Mediante la colocación del pararrayos, la descarga se dirigirá fuera del área donde se desea tener la protección.

El estudio y la instalación de los pararrayos son trabajo de especialistas, que tienen que prestar atención al trazado de los cables de cobre, juntas de control, tomas de tierra en forma de pata de oca para favorecer la circulación de las corrientes a alta frecuencia, distancias a las canalizaciones (agua, gas, electricidad...).

Por otro lado, la circulación de corriente de rayo induce un campo electromagnético a los circuitos interiores que se debe proteger (algunas decenas de kilovatios).

Por tanto, es necesario dividir las corrientes del pararrayos en dos, cuatro o más, de manera simétrica para minimizar los efectos electromagnéticos.

Actualmente, tres soluciones parecen, entre otras, interesantes:

- Pararrayos o puntas Franklin: es el más común y conocido. Es óptimo para proteger edificios en los que la altura predomina sobre la superficie. Su zona de protección se calcula aproximadamente en radio igual a su altura.
- Pararrayos Ingesco-PDC: entre el conjunto excitador, que está al mismo potencial que el aire circundante, la punta y el conjunto deflector, que se hallan a igual potencial que la tierra, se establece una diferencia de potencial que es tanto más elevada cuanto mayor es el gradiente de potencial atmosférico, es decir, cuanto más próxima esté la formación de un rayo.
- Pararrayos Ioniflash: emiten descargas eléctricas de polaridad inversa al rayo, de manera que consiguen atraerlo y elevar el punto de impacto por encima de la superficie que se debe proteger, por lo que se crea un mayor radio de cobertura frente a un pararrayos convencional. Son comparables a toda una instalación de puntas Franklin necesarias para cubrir la misma área de protección. Así, se consigue economizar en instalación y materiales de bajantes, tomas de tierra, equipotencialidad de éstas, etc.

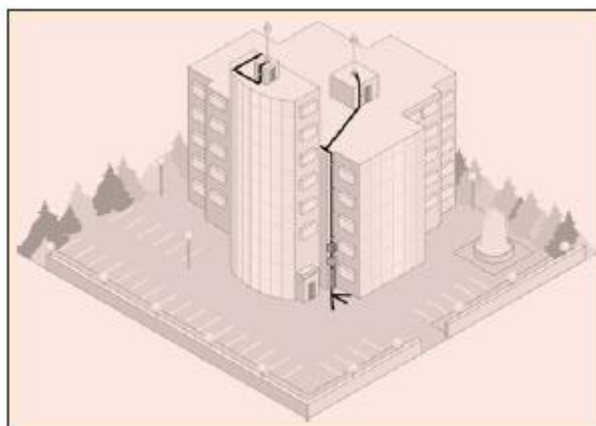


Figura 18. Pararrayos en un edificio.

- **Tendidos aéreos (Figura 19)**

Protección formada por uno o múltiples conductores aéreos situados sobre la estructura que se debe proteger. Los conductores se deberán unir a tierra mediante las bajantes en cada uno de sus extremos.

El área protegida vendrá dada por el área formada por el conjunto de conductores aéreos. Sus principales aplicaciones son militares y cables por encima de líneas de alta tensión.

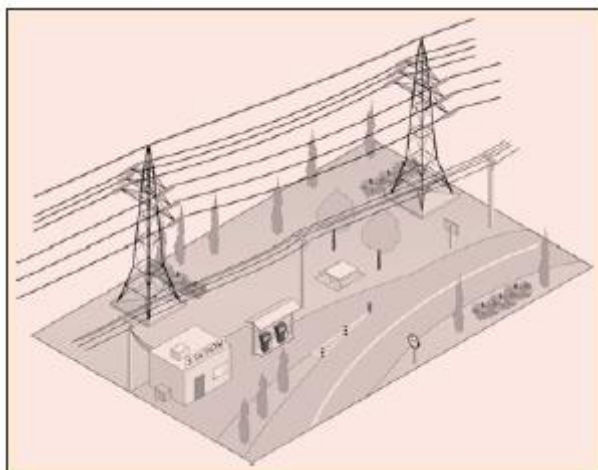


Figura 19. Tendido aéreo.

- **Caja mallada de Faraday (Figura 20)**

Este sistema consiste en multiplicar las líneas de descenso por el exterior de manera simétrica realizando uniones horizontales cuando el edificio es alto. Las uniones a la tierra se realizan en forma de pata de oca y el resultado consiste en obtener las mallas de 15 x 15 m o 10 x 10 m.

El efecto obtenido es una mejor equipotencialidad del edificio y la división de las corrientes de rayo, reduciendo así fuertemente los campos y las inducciones electromagnéticas.

Es el sistema pasivo de protección externa que da mayores garantías. Es óptimo para proteger edificios con índices de riesgo muy elevados, muy sensibles informáticamente o en los que se fabriquen circuitos integrados, o que tengan interés histórico.

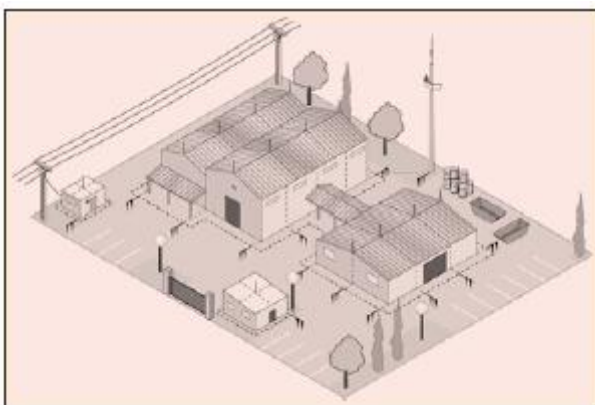


Figura 20. Caja mallada de Faraday.

2.2.2 Protecciones secundarias

Las protecciones secundarias se encargan de los efectos indirectos del rayo y/o de las sobretensiones de maniobra.

Su principio consiste en crear un circuito de derivación a tierra, permitiendo así la descarga de la corriente del rayo por cebado o conducción.

Se agruparían en:

- Los limitadores para redes BT.
- Los filtros.
- Los absorbedores de onda.

En ciertas condiciones, hay otros aparatos que pueden cumplir esta función como, por ejemplo, los transformadores, los pararrayos, los estabilizadores o los sistemas de alimentación interrumpida (SAI).

En la práctica, estos dispositivos tienen dos efectos: limitar la tensión de choque (protecciones paralelas), o limitar la potencia que se transmite (protecciones serie).

- **La protección serie**

La protección serie, como su nombre indica, se conectará en serie sobre los cables de alimentación del sistema que se debe proteger (**Figura 21**).

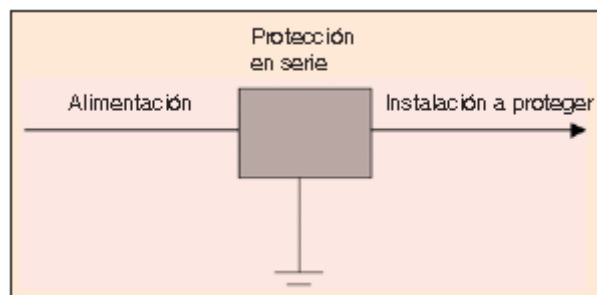


Figura 21. Principio de la protección en serie.

Los elementos más conocidos son:

- Los filtros: un filtro utiliza el principio de circuito RLC. Se calcula suponiendo que la perturbación que se debe filtrar ha sido correctamente identificada. Su objetivo se sitúa, muy especialmente, en la atenuación de sobretensiones de maniobra correspondientes a una banda de frecuencia definida. Esta protección no se adapta a sobretensiones atmosféricas (**Figura 22**).

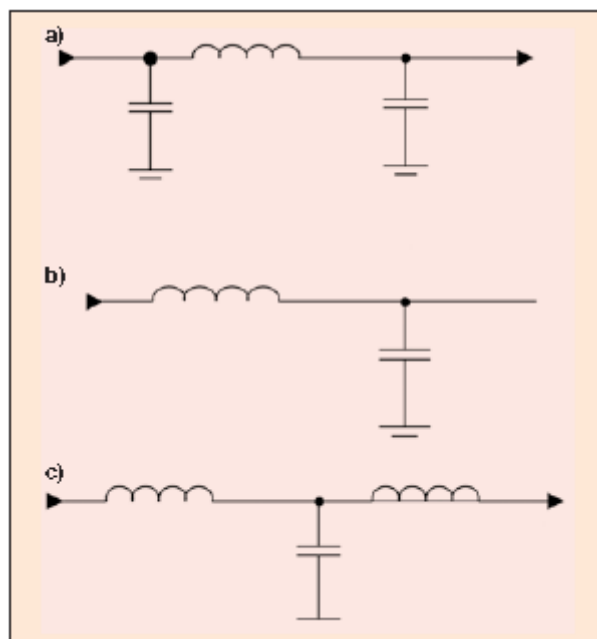


Figura 22. Esquemas básicos de filtros utilizados en BT: a) en L; b) en T; c) en p.

- Los transformadores: atenúan por efecto de inductancia las sobretensiones y hacen desaparecer por acople ciertos armónicos.
- Los absorbedores de onda están constituidos, esencialmente, por inductancias al aire para limitar las sobretensiones y limitadores para absorber las corrientes. Se adaptan perfectamente a la protección de aparatos sensibles informáticos y electrónicos. Funcionan únicamente contra las sobretensiones. No obstante, son muy grandes y caros. Estos aparatos serán indispensables en los onduladores que protegen las cargas contra el corte de la alimentación.
- Los acondicionadores de red y los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI): se utilizan para proteger el material muy sensible, como el informático, que necesita una alimentación de muy buena calidad. Estos equipos tienen muchas veces varios de los dispositivos descritos anteriormente y, por tanto, con ellos, forman parte de las protecciones secundarias. Permiten regular la tensión, la frecuencia, suprimir los parásitos y asegurar la continuidad de la alimentación eléctrica (SAI). Pero no protegen contra las sobretensiones importantes de tipo atmosférico, contra las cuales es necesario otro tipo de protección.

- **La protección paralela**

Su principio de funcionamiento (montado en paralelo a la red) hace que se adapten, sea cual sea la potencia de la instalación que se debe proteger. La protección paralela es la protección antisobretensión más utilizada actualmente (**Figura 23**).

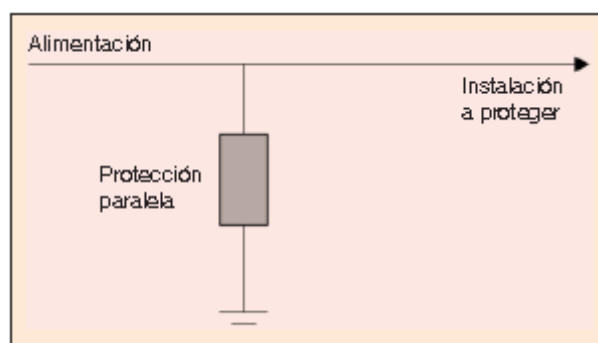


Figura 23. Principio de la protección paralela.

La filosofía general de funcionamiento de este tipo de protección es:

- En condiciones normales: los elementos presentan una impedancia muy alta para no alterar con su presencia el normal funcionamiento de la línea.
- Al alcanzar un nivel de tensión $>$ tensión nominal de red, el dispositivo de protección pasa a tener una baja impedancia y deriva a tierra.

Las características principales de la protección en paralelo son las siguientes:

- La tensión nominal de alimentación de la protección debe obtenerse de los bornes de la instalación 230/440 V.
- En ausencia de sobretensión, ninguna corriente de fuga debe circular a través de la protección, que está en posición de vigilancia.
- Cuando aparece una sobretensión que sobrepasa la tensión admisible para la instalación que se debe proteger, la protección conduce fuertemente la corriente, debido a dicha sobretensión, hacia tierra, limitando la tensión al nivel de protección deseado U_p .
- Cuando desaparece la sobretensión, la protección deja de actuar y se coloca en estado de vigilancia sin mantener la corriente (aunque se denomine corriente de seguimiento).
- La curva característica U/I ideal cumple las siguientes características:
 - El tiempo de respuesta (t_r) de la protección debe ser lo más corto posible para proteger rápidamente la instalación.
 - La protección debe estar dimensionada para acoger la energía, debido a la sobretensión previsible en función del lugar que se debe proteger.
 - La protección limitadora de sobretensiones debe ser capaz de soportar 20 choques en onda 8/20 μs de corriente nominal I_n , y una vez la corriente máxima admisible $I_{m\acute{a}x}$.

Los productos más utilizados en la protección paralela son:

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- Los limitadores de sobretensión utilizados en las redes, llamadas de *neutro aislado o impedante* (esquema IT), que se instalan a la salida del transformador MT/BT. Estos limitadores permiten derivar a tierra sobretensiones de gran energía y soportan la corriente de defecto a tierra de la red de MT (**Figura 24**).

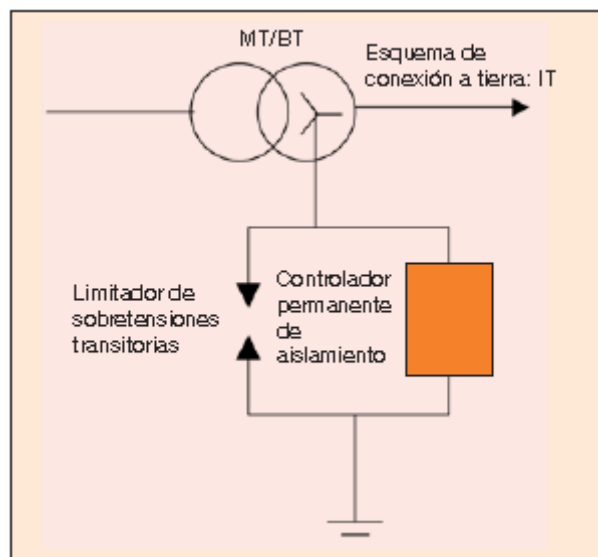


Figura 24. Limitador de sobretensiones transitorias en protección basta.

Limitadores de sobretensiones transitorias para Baja Tensión

Este tipo de aparamenta ha progresado mucho en materia de seguridad con unos ensayos normalizados reforzados. Este tipo de limitadores para líneas analógicas, digitales o circuitos de datos formarían el tercer nivel de protección llamado también de protección fina. En el apartado siguiente se estructurará la tecnología utilizada por la mayoría de limitadores.

Obviamente, una protección óptima será aquella que posea los tres niveles de protección, aunque no siempre es necesario. En muchos casos, con la combinación de dos de ellos, se obtiene una protección satisfactoria.

Existe toda una gama de limitadores de sobretensión: desde modulares para montaje en carril DIN simétrico, e instalables en un cuadro general de BT o en una caja de distribución, hasta modelos empotrables situados en las cajas de las tomas de corriente. Permiten cualquier derivación de corrientes con niveles de protección variable.

Este tipo de limitadores pueden estar formados por tecnologías diferentes. Las más conocidas son varistores, descargadores de gas o diodos Zener, pero existen otras muchas.

Limitadores de sobretensiones transitorias para líneas telefónicas

Las líneas telefónicas de transmisión de voz o datos, independientemente de que sean analógicas o digitales, están expuestas a sobretensiones transitorias de origen atmosférico por estar la mayor parte del tendido en el exterior.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

El tendido situado en instalaciones subterráneas también puede verse afectado por aumentos de potenciales del tierra provocados por la caída directa de un rayo al suelo o en un pararrayos. Igualmente, las líneas interiores próximas a dispositivos de maniobra, máquinas con motores de gran potencia, equipos de regulación, etc., pueden verse afectadas por inducción. Las consecuencias de estas sobretensiones serán la destrucción total o la avería de los equipos conectados a la línea (modems, centralitas, teléfonos, fax, etc.). Este tipo de limitadores limitarán a un valor bajo las sobretensiones de la línea eléctrica, de manera que evitarán la destrucción o las averías de los equipos conectados a la línea. Se montan sobre carril DIN simétrico y están pensados para proteger uno o dos pares telefónicos.

Existen varios tipos de limitadores para líneas telefónicas:

- Limitadores de sobretensiones para líneas telefónicas analógicas. Estos limitadores de carril DIN pueden ser paralelos, en cuyo caso se montarían en paralelo a la instalación, o serie, en cuyo caso se montarían en serie (Figura 25).
- Limitadores para líneas telefónicas digitales montados en serie a la instalación.

En el sector telefónico tenemos también otros dos tipos de protecciones:

- Módulos para montar sobre tarjetas de circuito impreso en centrales telefónicas.
- Alargadores o prolongadores mixtos para *alimentación baja tensión-telefonía*.
- Por último, todos los equipos de transmisión de datos pueden ser atacados y afectados por las sobretensiones y, por lo tanto, también hay que recomendar el uso de un tipo especial de limitadores de sobretensiones adecuado para instalaciones de domótica, informática o multimedia.



Figura 25. Limitadores para líneas telefónicas.

2.2.3 Limitadores de sobretensiones transitorias

Los limitadores de sobretensiones transitorias se instalan donde se espera que pueda llegar un impulso de tensión de corta duración que pueda dañar los materiales instalados. De este modo, a la salida del limitador se tendrá, en condiciones normales, una tensión

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

máxima que no interfiera en el circuito situado a continuación. Por lo tanto, los limitadores instalados en circuitos protectores a nivel secundario y terciario limitan las sobretensiones transitorias.

Para evaluar cualquier tipo de limitador, deben tomarse en consideración los siguientes puntos:

1. Tener en cuenta sobre todo las características siguientes: energía, temperatura, dimensiones, tiempos de respuesta, corrientes de fuga y capacidad del limitador.
2. Factor de limitación (*clamping factor*): cociente entre la tensión de limitación a una corriente extremadamente pequeña y la máxima tensión en extremos del protector durante unas condiciones transitorias especificadas.
3. Las tensiones disponibles.
4. El coste por julio: es conveniente evaluar el coste real de la protección en términos de W/s.
5. La fiabilidad: el limitador funcionará a la máxima temperatura. Cumple alguna norma. Tiene desgaste.
6. El limitador no debe interferir en el funcionamiento normal del equipo.
7. Durante su funcionamiento dinámico, debe limitar instantáneamente las sobretensiones a un nivel de seguridad.
8. El limitador no debe cambiar sus características con el tiempo.
9. Si se exceden sus características, debe cambiar a un estado conocido y deseado.
10. Debe ser mecánicamente compatible con el equipo, tanto en tamaño como en técnicas de montaje.
11. Como no contribuye al funcionamiento del sistema, debe tener un coste bajo relativo al coste global del sistema.

En la selección de un limitador de sobretensiones, se deben describir o evaluar las condiciones transitorias y las permanentes. Para ello:

1. Debe definirse o estimarse la forma de onda del transitorio en cuanto a su impedancia de fuente y al pico de tensión.
2. Debe determinarse la máxima potencia que se puede disipar: un factor que influye en la potencia disipable en un limitador es la frecuencia de repetición de los picos.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

3. Una característica muy importante de un limitador es su rapidez de respuesta en la supresión de sobretensiones, lo cual incluye el tiempo de respuesta y la tensión de limitación.

4. Por último, y lo más importante, es cuál debe ser la tensión de limitación del supresor. Ésta será la máxima tensión que aparece en extremos del supresor debida al pico de intensidad, y debe seleccionarse por debajo del umbral de fallo de los componentes del circuito.

No existe, ni probablemente existirá, un limitador que cumpla todos estos requisitos a la vez. Afortunadamente, un equipo no necesita que se cumplan todos, sino que se debe alcanzar un compromiso entre coste y protección. Por este motivo, en los circuitos de protección contra sobretensiones, se disponen diferentes limitadores en conexión en serie entre sí, en conexión paralela o en una combinación determinada, de manera que se llegue a una máxima protección.

- Principios de funcionamiento de los limitadores de sobretensiones transitorias

A diferencia de otros elementos de protección de instalaciones como interruptores magneto térmicos o diferenciales, que se colocan en serie, los limitadores de sobretensiones deben colocarse en paralelo para un funcionamiento correcto del sistema de protección.

El comportamiento de un limitador de sobretensiones sigue un funcionamiento simple: su resistencia depende de la tensión en sus bornes.

En funcionamiento normal, es decir, sin ningún tipo de sobretensión, la tensión aguas arriba (U_a) es menor que la de cebado del limitador, la resistencia del limitador es muy elevada (aprox. $1\text{ M}\Omega$) y la corriente, muy débil (aprox. $< 800\text{ }\mu\text{A}$).

Al crearse una sobretensión, la tensión aguas arriba del limitador será mayor que la de cebado. Es en este momento cuando el valor de la resistencia se vuelve débil (prácticamente nula) y la intensidad comienza a circular. A continuación, la tensión disminuye y se vuelve inferior a la de cebado, que se convierte en tensión residual debido al paso de corriente hacia la tierra y será la que soportará la carga que se debe proteger.

Cuando se elimina la onda pasante, se dice que la sobretensión se ha decrestado. La tensión que queda en los bornes durante el paso de la corriente se denomina *tensión residual*. Este valor dependerá de la cantidad de corriente que circule por la resistencia.

Los limitadores de sobretensiones se caracterizan por una $I_{m\acute{a}x}$ (intensidad de descarga mayor que puede aguantar el limitador una sola vez) y diferentes valores residuales para una corriente dada (intensidad nominal), denominada *nivel de protección* (U_p). Un parámetro importante que se debe considerar es el tiempo durante el cual existe un paso de corriente, pues determina la cantidad de energía que será disipada en la operación: $Q = i \times t$. Esta energía disipada tendrá una fuerza proporcional al tiempo que esté el limitador en estado de paso de corriente. Este parámetro será de suma importancia

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

a la hora de escoger un limitador, pues esta energía es destructora y hace envejecer prematuramente los elementos del dispositivo.

- Tiempo de respuesta de una protección

El tiempo de respuesta (T_r) de una protección es el tiempo que tarda en reaccionar desde el momento en el que aparece la sobretensión transitoria.

Se observa que el tiempo de respuesta dado por la protección será mayor cuanto mayor sea la velocidad de subida de la tensión de perturbación y el valor residual de la protección (tensión máxima a la que está sometido el equipo que se debe proteger).

La velocidad de subida de la tensión de perturbación es aleatoria y depende, esencialmente, del origen de las sobretensiones. Es, por tanto, un elemento variable.

Los tiempos de respuesta máximos de una protección son, por el contrario, conocidos y, generalmente, dados por los fabricantes en sus fichas técnicas.

Una protección ante un tiempo débil de respuesta limitará sobretensiones a valores débiles, admitidos por los componentes sensibles, y evitará su destrucción.

Del mismo modo, una protección con un tiempo de respuesta largo será ineficaz si los componentes contenidos en la instalación que se debe proteger son muy sensibles o tienen un tiempo de reacción a las sobretensiones más corto que sus protecciones (**Figura 26**).

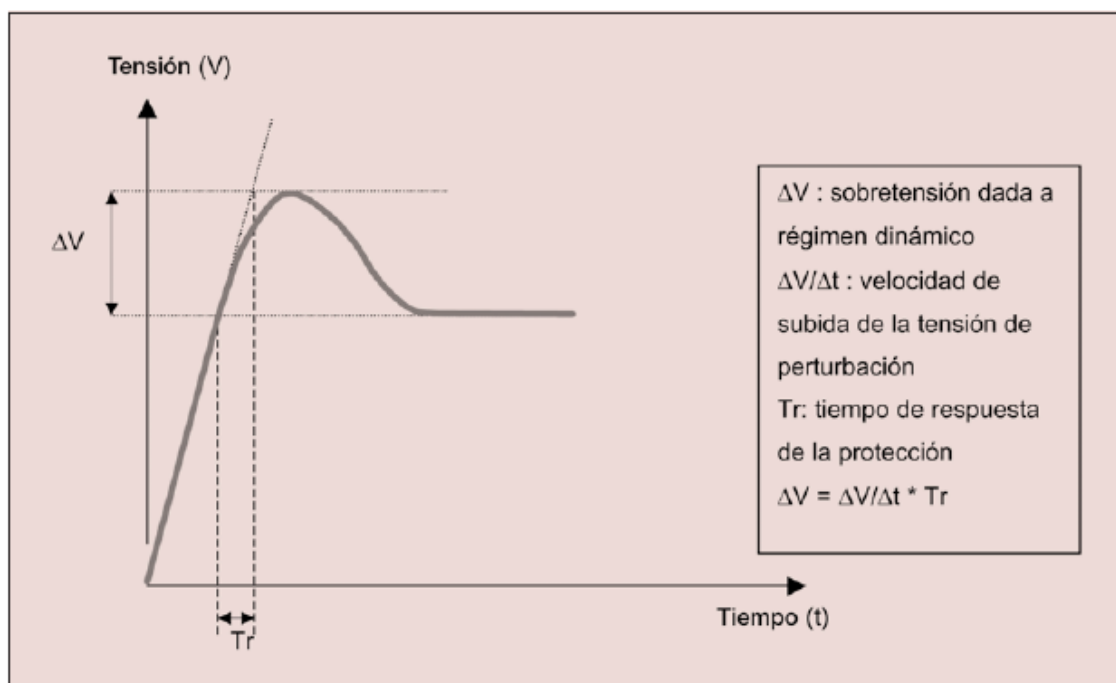


Figura 26. Tiempo de respuesta.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- Tecnologías de los limitadores de sobretensiones transitorias

Los principales componentes limitadores son (**Figura 27**):

- Descargadores abiertos: se usan en protecciones secundarias, sólo en instalaciones de pararrayos. El aire ambiente es el dieléctrico. Y la tensión de encendido del descargador, que depende de la humedad y de las impurezas del aire, no se puede definir exactamente.

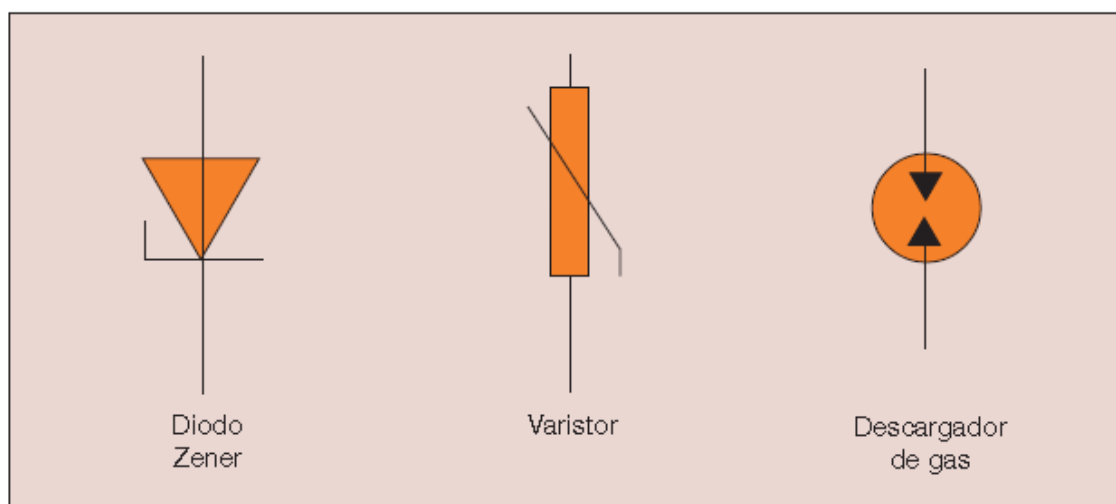


Figura 27. Símbolos de limitadores de sobretensión.

- Descargadores con dieléctrico fijo o de contorno deslizante. Tienen electrodos de cobre-wolframio separados por un plástico especial. Cuando el arco voltaico está próximo a dicho plástico, éste desprende un gas que provoca una corriente de aire y empuja el arco voltaico hacia afuera apagándolo.
- Descargadores de carbón.
- Descargadores de gas: constan de un tubo de cerámica o cristal lleno de gas noble (argón, neón...) a una presión determinada, en el que encontramos dos electrodos. Su función principal es la de funcionar como circuito abierto a tensiones normales y hacer fluir la corriente de rayo desde que la sobretensión que aparece en la línea es suficiente para cebar el gas.
- Varistores de óxido de cinc (**Figura 28**) y de carburo de silicio: este componente, llamado también VOM (varistor de óxido metálico) es una resistencia no lineal cuyo valor desciende con la tensión en sus extremos.

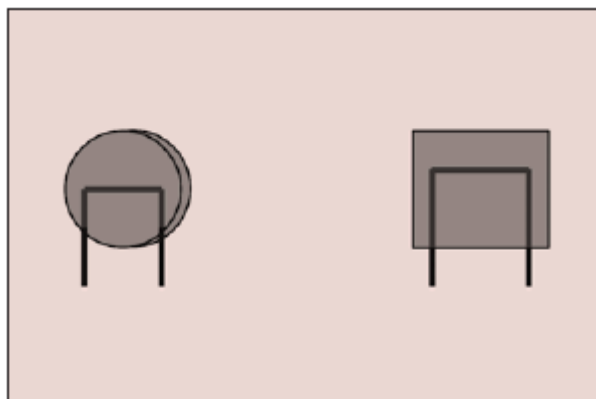


Figura 28. Varistores de óxido de zinc.

- Diodos supresores de silicio o selenio: son uniones PN que agrupan varios componentes electrónicos (diodos, tiristores, triacs, etc.). Se utilizan en BT y, sobre todo, en líneas telefónicas. Al destruirse se cortocircuitan y producen un fallo eléctrico fácil de detectar. Los supresores de selenio y los descargadores de carbón son limitadores que han caído en desuso al ser sustituidos por otros mejores.

A continuación estudiaremos con más detenimiento los descargadores abiertos, los diodos Zener, los varistores y los descargadores de gas. De estas cuatro tecnologías, los descargadores abiertos se utilizan para la protección basta (descargadores de rayos) en protecciones secundarias, los descargadores de gas y varistores se utilizan para protección media o fina, y los diodos Zener se utilizan para protección ultraterminal en asociación con algún limitador.

- Diodos Zener

Un diodo Zener ha sido pensado, diseñado y fabricado como un componente regulador de tensión. A pesar de tener ciertas aptitudes como supresor de transitorios, no es conveniente usarlo como tal, aunque en algunas aplicaciones no críticas pueda suplir, en según qué circunstancias, algún limitador, pero siempre con la seguridad de que su respuesta será mucho peor.

La curva característica de un diodo Zener es muy próxima a la ideal. El tiempo de respuesta es extremadamente rápido (del orden de pico-segundos: 10–12) para una tensión umbral determinada (U_s) y la corriente de fuga, despreciable. Sin embargo, el diodo Zener presenta el inconveniente de disipar una energía muy débil.

Basta poner un ejemplo: un diodo Zener de 10/1 W no puede absorber un pico de intensidad más allá de 5 A en un tiempo de 100 ms con una tensión de limitación de 14,3 V, mientras que un diodo supresor tiene para el mismo pico de intensidad una tensión de limitación de 10,3 V y puede llegar a absorber un pico de 80 A. Este componente no se debe situar nunca en cabecera de la instalación, pero se puede utilizar en protección ultraterminal y siempre en coordinación con otro limitador de sobretensión.

➤ Tecnología varistor

Los varistores son resistencias no lineales cuyo valor desciende con la tensión en sus extremos.

▪ Características

Estos limitadores bipolares presentan, generalmente, una forma circular de 5 a 40 mm de diámetro y de 3 a 1 mm de espesor, de la cual cuelgan dos hilos metálicos que sirven de unión con el circuito eléctrico. Las dos caras del varistor están formadas por dos placas metálicas entre las que se encuentra, principalmente, un óxido metálico. La unión de estas placas se recubre con barniz de acabado.

Se distinguen dos tipos de varistores: de carburo de silicio y de óxido de cinc. Algunos de sus nombres comerciales en función de las marcas son SIOV, MOV (varistor de óxido metálico) y ZNR. El varistor de óxido de cinc tiene mejor característica de intensidad/tensión que el varistor de carburo de silicio. Éste posee una característica intensidad/tensión no lineal dada por la relación:

$$i = k u^a \quad (\text{Ecuación 1})$$

u tensión en bornes del varistor

i intensidad de corriente

k constante

a coeficiente de no linealidad

El varistor de óxido de cinc se compone de granos de ZnO cimentados en otros de óxidos metálicos. Estos varistores serán los más usados. La característica del varistor se observa en la **Figura 29**, que presenta cuatro regiones:

- **Región I:** el limitador presenta una resistencia elevada. La corriente es proporcional a la tensión aplicada teniendo en cuenta una variación en función de la temperatura ($a = 1$). Esta zona corresponde al funcionamiento normal del varistor. El varistor se comporta prácticamente como un circuito abierto.
- **Región II:** corresponde a las tensiones medias y en ella se asimila la intensidad como el cuadrado de la tensión: u^2 ($a = 2$), que corresponde a un modo de conducción limitado por las cargas en el espacio. La corriente es función de la temperatura. El varistor se sitúa en esta zona en caso de sobretensiones temporales moderadas. La tensión de referencia (U_{ref}) de un varistor corresponde, en general, a una curva de característica $i(u)$, siendo la corriente lo suficientemente importante como para considerarse despreciable. Normalmente, se define la tensión U_{ref} para un valor de corriente de 1 mA.
- **Región III:** corresponde a un comportamiento fuertemente no lineal de la señal y en ella el varistor presenta una resistencia ($a = 50$). En esta región, la característica $i(u)$ es independiente de la temperatura. Es la zona de las sobretensiones de maniobra y de las atmosféricas moderadas.

- **Región IV:** se denomina zona de saturación. En ella, la conducción está limitada por una resistencia de granos de ZnO y por los electrodos. La característica $i(u)$ ($a = 1$) es independiente de la temperatura. Es la zona de las sobretensiones de rayo.

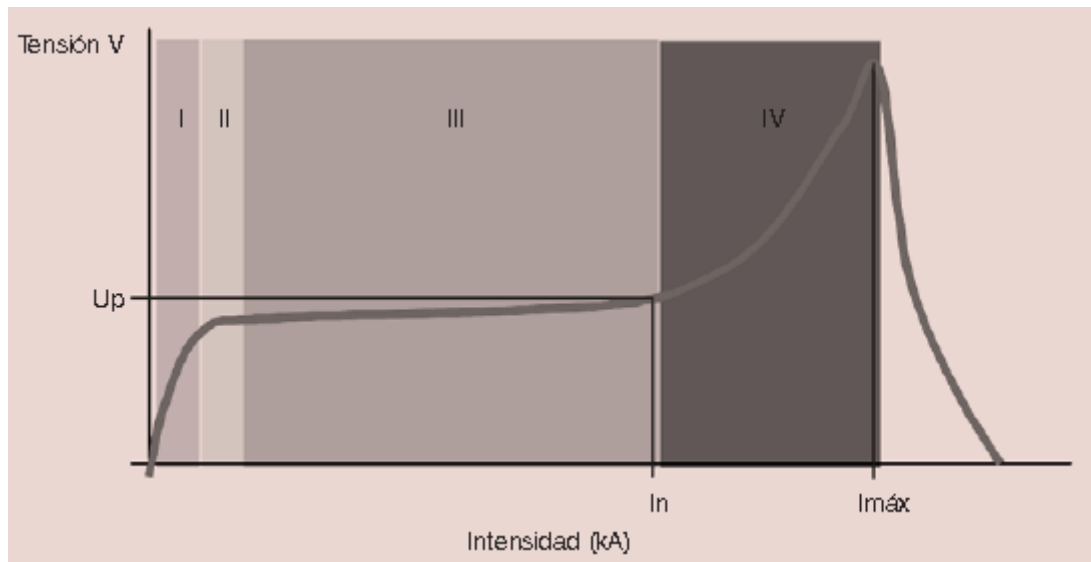


Figura 29. Característica corriente-tensión de la tecnología varistor.

▪ Funcionamiento

Cuando se coloca un varistor entre conductores activos, en funcionamiento normal, se comporta prácticamente como un circuito abierto. Cuando se produce una sobretensión, la respuesta de reacción es muy rápida, del orden de nanosegundos (10^{-9} s) y mantiene la tensión y la potencia a un nivel muy bajo. Una carga conectada a una red eléctrica, protegida con un varistor, no soportará la sobretensión, sino que estará limitada a una tensión residual que será función de las características del varistor utilizado y de la intensidad de la perturbación. Este fenómeno se observa en la figura donde la onda de tensión está limitada gracias a la utilización de un varistor (**Figura 30**).

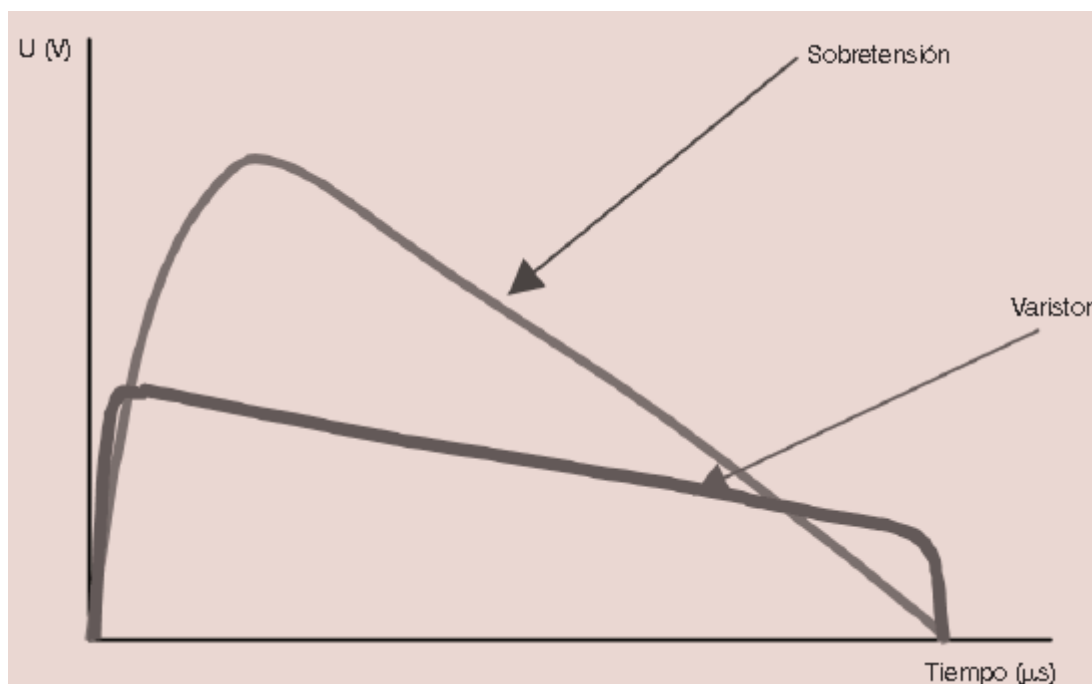


Figura 30. Funcionamiento de la tecnología varistor durante una sobretensión transitoria.

Los parámetros más importantes para un varistor son: la energía que puede disipar, el nivel de protección (U_p) y la tensión máxima de servicio permanente U_c . Los varistores son elementos que aguantan en un espacio de tiempo muy corto sobretensiones de pico muy elevado (15-20 kV en microsegundos), pero se destruyen con valores bajos de tensión en unos pocos segundos.

Un varistor se define, en muchos casos, por su tensión máxima de servicio permanente U_c :

- Un varistor con una tensión máxima de servicio permanente U_c elevada tendrá un nivel de protección elevado, es decir, un valor de U_p alto, con lo cual una protección de los receptores es ineficaz. Sin embargo, este tipo de varistor será insensible a sobretensiones temporales de amplitud moderada.
- Un varistor con una tensión máxima de servicio permanente U_c baja tendrá un nivel de protección bajo, por lo tanto, un valor de U_p bajo y una protección de los receptores muy satisfactoria. Sin embargo, este tipo de varistores será insensible a sobretensiones temporales de amplitud moderada.

Por consiguiente, la elección de un varistor vendrá impuesta por el valor de U_c y el de U_p . Habrá un compromiso entre un valor pequeño de U_p que garantice una protección eficaz y un valor elevado de U_c que permita aumentar la vida del componente.

Además, la energía máxima admisible para un varistor depende de su volumen, del tipo de fenómeno (atmosférico, maniobra...) y de las condiciones de disipación térmicas

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

(electrodo, ambiente...). Normalmente, se ensayan con una corriente asociada a una forma de onda de corriente dada por la norma internacional IEC, por ejemplo 65 kA (en onda 8/20 μ s).

La ventaja principal de los varistores es la razón entre la energía disipada y el coste, que la sitúa como un componente incontestable en la fabricación de limitadores de sobretensión.

La mayor dificultad está en su colocación, ya que:

- El valor de la U_p del varistor depende del valor de su U_c .
- Una serie de descargas de poca energía provocan un calentamiento que acelera su envejecimiento.
- Una energía mayor implica la destrucción del componente porque se queda en cortocircuito.

➤ Tecnología descargador

Colocado entre la línea que se debe proteger y la tierra, tiene como función principal la de funcionar como circuito abierto a tensiones normales y hacer fluir la corriente de rayo desde que la sobretensión que aparece en la línea es suficiente para cebar el gas entre dos electrodos. Después del paso del transitorio de sobretensión, la conducción cesa y el aislamiento original se reinstaura.

Existen varios tipos de descargadores, pero según el dieléctrico empleado pueden diferenciarse tres tipos de descargadores de sobretensión básicos: abiertos, con dieléctrico fijo o de contorno deslizante y de gas.

- Los descargadores abiertos

En ellos, el aire ambiental sirve como dieléctrico. La tensión de encendido del descargador abierto no puede definirse exactamente, dado que depende de la humedad o de las impurezas del aire. Generalmente, los descargadores abiertos sólo encuentran aplicación en las instalaciones en las que se permite una tensión residual relativamente alta como, por ejemplo, en las instalaciones de pararrayos. El diseño de los electrodos, su distancia y el material utilizado, determinan el valor de tensión de encendido o de cebado, la capacidad de descarga y su comportamiento de apagado.

Los limitadores de sobretensiones transitorias formados por descargadores abiertos suelen situarse en cabecera de la instalación para eliminar la posible caída directa del rayo en la instalación. Normalmente estos limitadores, también llamados descargadores de rayos, comienzan a fluir cuando la sobretensión es superior o igual a 4 kV. Una vez que comienzan su actuación, descargarán toda la sobretensión a tierra. Sin embargo, estos descargadores no actuarán cuando la sobretensión sea inferior a la tensión de cebado (para descargadores abiertos esta tensión es del valor de 4 kV). Debido a que una sobretensión

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

de entre 2 y 4 kV puede provocar problemas en las instalaciones, será necesario instalar un segundo limitador capaz de limitar sobretensiones de este tipo.

En definitiva, la instalación de un descargador abierto limitará sobretensiones muy elevadas, de ahí el nombre de *protección basta*, pero no asegurará la protección total de las instalaciones. Se tendrá que realizar *cascading* o coordinación de limitadores para conseguir una máxima protección (este tema será tratado en capítulos posteriores).

- Descargadores abiertos de contorneo deslizante

Para la red existen los descargadores abiertos de contorneo deslizante con electrodos redondos de cobre-wolframio, separados por un plástico especial que gasea cuando el arco voltaico se encuentra muy cercano al mismo. De manera que produce una cierta corriente de aire que empuja el arco voltaico hacia fuera y provoca el apagado de la repetición de la red, que es autoextinguible.

- Descargadores de gas (Figura 31)

En general, un descargador de gas está formado por un tubo de cerámica o de cristal en el que se encuentran dos electrodos. La cámara de tubo está llena de gas noble, generalmente argón o neón, que se encuentra a una determinada presión.

La composición del gas noble permite un mecanismo de encendido definido, al contrario que los descargadores abiertos.

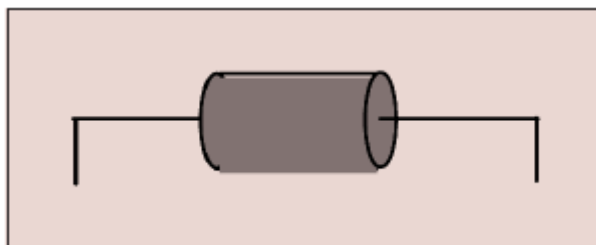


Figura 31. Descargador de gas.

Cuando la tensión en los electrodos alcanza un valor superior a la de encendido (-700 V), se inicia un proceso de ionización por el cual la resistencia de la descarga de paso pasa de alta a baja. Tras la ionización, la tensión en sus bornes (tensión de arco) es de 10 a 100 V para corrientes de 1 a 1.000 A. Antes de alcanzar la tensión de arco, el descargador pasa por una fase de fluencia con una corriente típicamente inferior a 1 A. Por debajo de un cierto nivel de corriente (corriente de mantenimiento), el descargador se extinguirá desde el momento que la tensión aplicada sea inferior a la tensión de extinción. Tras el paso de la sobretensión, el descargador vuelve a su estado de reposo, aislando la línea de tierra, si ésta está alimentada por una fuente de energía de fuerte impedancia (caso de una línea telefónica, por ejemplo), de manera que permite reducir la corriente de seguimiento (Figura 32).

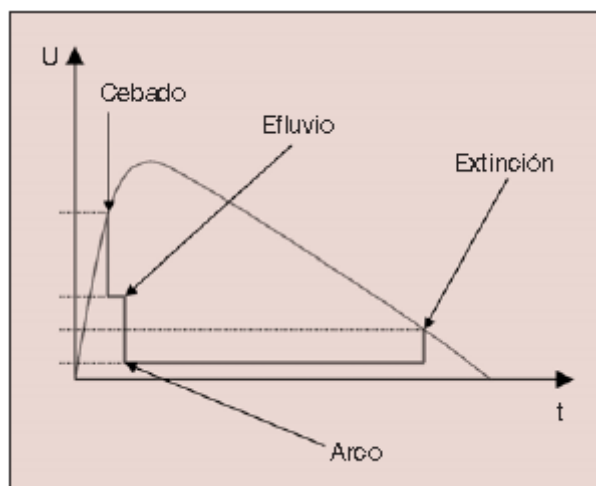


Figura 32. Funcionamiento de la tecnología descargador de gas durante una sobretensión transitoria.

La curva característica de corriente y tensión se presenta en la **Figura 33**. Esta característica es importante para poder determinar si después de extinguir un impulso de sobretensión, el descargador de gas puede interrumpir de nuevo por sí solo el circuito. La posibilidad de que el gas permanezca ionizado depende de la tensión de servicio del sistema y de la corriente secuencial de la red o corriente de seguimiento. Dicha corriente es la intensidad que circula a través de éste mientras está descargando. Si el descargador de gas no puede interrumpir independientemente la corriente de red, debe insertarse un fusible entre el descargador de gas y la red, o un varistor en serie.

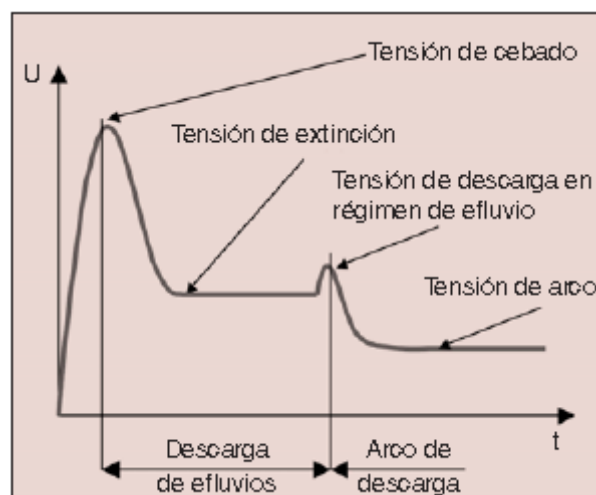


Figura 33. Característica corriente-tensión de la tecnología descargador de gas.

En un descargador de gas de 230 V de tensión estática, en el caso de llegarle flancos de gran pendiente, este valor aumenta como consecuencia del tiempo de ionización, pero sigue manteniéndose entre 700 y 800 V con pendientes que aumentan a razón de 10 kV/ms. La tensión aumenta, antes del encendido, aproximadamente 700 V y cae inmediatamente a unos 2 V en el arco.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

A pesar de que el disparo del descargador sea rápido, el pico de tensión residual todavía sigue siendo grande para poder ser absorbido directamente por equipos electrónicos. Por ello, se requieren otros limitadores, como varistores que sean capaces de resistir picos de tensión, en este caso, de 800 V en 0,5 ms.

Por otra parte, la creación de una descarga dentro de un gas es un proceso probable y la tensión de cebado de los descargadores de gas depende de la pendiente de la tensión perturbadora transitoria que se presente.

Cuanto mayor es la pendiente del impulso perturbador, tanto más alto es el valor de reacción de la distancia de descarga de gas, y más corto el tiempo de reacción. La corriente de derivación asciende a varias decenas de kiloamperios.

Por esta razón el descargador de gas no es apropiado para derivar a tierra con seguridad la caída directa de un rayo, porque en este caso debe calcularse con amplitudes de corriente de cientos de kiloamperios (se usarán descargadores abiertos).

Los descargadores de gas son limitadores adecuados para la protección de circuitos electrónicos, redes de tipo telecomunicaciones o de energía en serie con un varistor.

Sus ventajas principales son un fuerte poder de disipación de energía y una corriente de fuga despreciable en el tiempo y, por tanto, se reduce el envejecimiento del limitador por calentamiento.

Su inconveniente es que posee un tiempo de respuesta lento, ligado al frente de la onda de sobretensión y a la tensión máxima, superior a la tensión umbral para ionizar el gas y ponerlo en conducción. Cuando la tensión continúa en sus bornes, el descargador sigue ionizado y una corriente de mantenimiento circula por su interior.

3. Normativa e instalaciones en España

La normativa española contemplada para las sobretensiones transitorias es la ITC N°23 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (Real Decreto 842/2002) y la sección 8 del Documento Básico de Seguridad de Utilización (SU8) del Código Técnico de la edificación (CTE) (Real Decreto 984/2009).

El ITC N°23 del REBT tratará las sobretensiones debidas a la influencia descarga lejana del rayo, conmutaciones de la red, defectos de red, efectos inductivos, capacitivos, etc.

Y el SU8 del CTE tratará las sobretensiones producidas como consecuencia de la descarga directa del rayo.

3.1 ITC N°23 / REBT 2002

Ahora se procederá a analizar y comentar apartado por apartado la Instrucción Técnica Complementaria N°23 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.

3.1.1 Objeto y campo de aplicación

Esta instrucción trata de la protección de las instalaciones eléctricas interiores contra las sobretensiones transitorias que se transmiten por las redes de distribución y que se originan, fundamentalmente, como consecuencia de las descargas atmosféricas, conmutaciones de redes y defectos en las mismas.

Conforme al artículo 16.1 del REBT, dentro del concepto de instalación interior hay que incluir cualquier instalación receptora aunque toda ella o alguna de sus partes esté situada a la intemperie, como por ejemplo parques de caravanas, marinas, ferias y stands, instalaciones agrícolas, generadores eólicos, etc.

El nivel de sobretensión que puede aparecer en la red es función del: nivel isoceraúnico estimado, tipo de acometida aérea o subterránea, proximidad del transformador de MT/BT, etc. La incidencia que la sobretensión puede tener en la seguridad de las personas, instalaciones y equipos, así como su repercusión en la continuidad del servicio es función de:

- *La coordinación del aislamiento de los equipos*
- *Las características de los dispositivos de protección contra sobretensiones, su instalación y su ubicación.*
- *La existencia de una adecuada red de tierras.*

Esta instrucción contiene las indicaciones a considerar para cuando la protección contra sobretensiones está prescrita o recomendada en las líneas de alimentación

principal 230/400 V en corriente alterna, no contemplándose en la misma otros casos como, por ejemplo, la protección de señales de medida, control y telecomunicación.

En general, las sobretensiones originadas por maniobras en las redes son inferiores, en valor de cresta, a las atmosféricas y por ello generalmente, los requisitos de protección contra sobretensiones atmosféricas garantizan la protección contra sobretensiones de maniobra.

3.1.2 Categoría de las sobretensiones

➤ *Objeto de las categorías*

Las categorías de sobretensiones permiten distinguir los diversos grados de tensión soportada a las sobretensiones en cada una de las partes de la instalación, equipos y receptores. Mediante una adecuada selección de la categoría, se puede lograr la coordinación del aislamiento necesario en el conjunto de la instalación, reduciendo el riesgo de fallo a un nivel aceptable y proporcionando una base para el control de la sobretensión.

Las categorías indican los valores de tensión soportada a la onda de choque de sobretensión que deben de tener los equipos, determinando, a su vez, el valor límite máximo de tensión residual que deben permitir los diferentes dispositivos de protección de cada zona para evitar el posible daño de dichos equipos. La reducción de las sobretensiones de entrada a valores inferiores a los indicados en cada categoría se consigue con una estrategia de protección en cascada que integra tres niveles de protección: basta, media y fina, logrando de esta forma un nivel de tensión residual no peligroso para los equipos y una capacidad de derivación de energía que prolonga la vida y efectividad de los dispositivos de protección.

➤ *Descripción de las categorías de sobretensiones*

*En la **Tabla 4** se distinguen 4 categorías diferentes, indicando en cada caso el nivel de tensión soportada a impulsos, en kV, según la tensión nominal de la instalación.*

Categoría I

Se aplica a los equipos muy sensibles a las sobretensiones y que están destinados a ser conectados a la instalación eléctrica fija. En este caso, las medidas de protección se toman fuera de los equipos a proteger, ya sea en la instalación fija o entre la instalación fija y los equipos, con objeto de limitar las sobretensiones a un nivel específico.

Ejemplo: ordenadores, equipos electrónicos muy sensibles, etc.

Categoría II

Se aplica a los equipos destinados a conectarse a una instalación eléctrica fija.

Ejemplo: electrodomésticos, herramientas portátiles y otros equipos similares.

Categoría III

Se aplica a los equipos y materiales que forman parte de la instalación eléctrica fija y a otros equipos para los cuales se requiere un alto nivel de fiabilidad.

Ejemplo: armarios de distribución, embarrados, apartamento (interruptores, seccionadores, tomas de corriente...), canalizaciones y sus accesorios (cables, caja de derivación...), motores con conexión eléctrica fija (ascensores, máquinas industriales...), etc.

Categoría IV

Se aplica a los equipos y materiales que se conectan en el origen o muy próximos al origen de la instalación, aguas arriba del cuadro de distribución.

Ejemplo: contadores de energía, aparatos de telemedida, equipos principales de protección contra sobreintensidades, etc.

3.1.3 Medidas para el control de las sobretensiones

Es preciso distinguir dos tipos de sobretensiones:

- Las producidas como consecuencia de la descarga directa del rayo. Esta instrucción no trata este caso.

Esta instrucción no contempla las características del sistema externo de protección contra el rayo, que están recogidas en el Código Técnico de la Edificación, en la sección ocho del Documento Básico de Seguridad de Utilización (SU8). Sin embargo, sí que se consideran los sistemas internos mediante dispositivos de protección contra sobretensiones que reducen los efectos eléctricos y magnéticos de la corriente de descarga atmosférica dentro del espacio a proteger.

- Las debidas a la influencia de la descarga lejana del rayo, conmutaciones de la red, defectos de red, efectos inductivos, capacitivos, etc.

Los efectos capacitivos e inductivos son debidos a:

- descargas atmosféricas en el propio sistema de protección externa (pararrayos,...) o en las inmediaciones (árboles, estructuras, etc.);
- el acoplamiento capacitivo entre primario y secundario en el caso de descargas atmosféricas en la línea aérea de AT;
- el acoplamiento inductivo por las maniobras de equipos con reactancia de valor elevado (hornos de inducción, máquinas de soldadura eléctrica, transformadores, etc.)

Se pueden presentar dos situaciones diferentes:

- *Situación natural: cuando no es preciso la protección contra las sobretensiones transitorias*
- *Situación controlada: cuando es preciso la protección contra las sobretensiones transitorias*

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

➤ *Situación natural*

Cuando se prevé un bajo riesgo de sobretensiones en una instalación (debido a que está alimentada por una red subterránea en su totalidad), se considera suficiente la resistencia a las sobretensiones de los equipos que se indica en la Tabla 1 y no se requiere ninguna protección suplementaria contra las sobretensiones transitorias.

Una línea aérea constituida por conductores aislados con pantalla metálica unida a tierra en sus dos extremos, se considera equivalente a una línea subterránea.

➤ *Situación controlada*

Cuando una instalación se alimenta por, o incluye, una línea aérea con conductores desnudos o aislados, se considera necesaria una protección contra sobretensiones de origen atmosférico en el origen de la instalación.

El nivel de sobretensiones puede controlarse mediante dispositivos de protección contra las sobretensiones colocados en las líneas aéreas (siempre que estén suficientemente próximos al origen de la instalación) o en la instalación eléctrica del edificio.

También se considera situación controlada aquella situación natural en que es conveniente incluir dispositivos de protección para una mayor seguridad (por ejemplo, continuidad de servicio, valor económico de los equipos, pérdidas irreparables, etc.).

Se consideran situaciones controladas que deberán disponer de protección contra sobretensiones, todas aquellas instalaciones en las que el fallo del suministro o de los equipos debido a la sobretensión pudiera afectar a:

- la vida humana, por ejemplo servicios de seguridad, centros de emergencias, equipo médico en hospitales.
- la vida de los animales, por ejemplo explotaciones ganaderas, piscifactorías, etc.
- los servicios públicos, por ejemplo pérdida de servicios para el público, centros informáticos, sistemas de telecomunicación.
- las instalaciones de los locales de pública concurrencia cubiertos por la ITC-BT-28.
- la actividad agrícola o industrial en función del impacto económico que pudieran implicar las sobretensiones (continuidad del servicio, destrucción de equipos, etc.).

Además, es recomendable tener en cuenta el coste y sensibilidad de los equipos ya que cuanto más sensible sea un aparato y mayor coste tenga, mayor protección debería recibir. Este es el caso de equipos informáticos en general, pantallas de plasma, etc.

Los dispositivos de protección contra sobretensiones de origen atmosférico deben seleccionarse de forma que su nivel de protección sea inferior a la tensión soportada a impulso de la categoría de los equipos y materiales que se prevé que se vayan a instalar.

En redes TT o IT, los descargadores se conectarán entre cada uno de los conductores, incluyendo el neutro o compensador y la tierra de la instalación. En redes TN-S, los

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

descargadores se conectarán entre cada uno de los conductores de fase y el conductor de protección. En redes TN-C, los descargadores se conectarán entre cada uno de los conductores de fase y el neutro o compensador. No obstante se permiten otras formas de conexión, siempre que se demuestre su eficacia.

3.1.4 Selección de los materiales en la instalación

*Los equipos y materiales deben escogerse de manera que su tensión soportada a impulsos no sea inferior a la tensión soportada prescrita en la **Tabla 4**, según su categoría.*

*Los equipos y materiales que tengan una tensión soportada a impulsos inferior a la indicada en la **Tabla 4**, se pueden utilizar, no obstante:*

- en situación natural, cuando el riesgo sea aceptable.
- en situación controlada, si la protección contra las sobretensiones es adecuada,

TENSIÓN NOMINAL DE LA INSTALACIÓN		TENSIÓN SOPORTADA A IMPULSOS 1,2/50 (kV)			
SISTEMAS TRIFÁSICOS	SISTEMAS MONOFÁSICOS	CATEGORÍA IV	CATEGORÍA III	CATEGORÍA II	CATEGORÍA I
230/400	230	6	4	2,5	1,5
400/690 1000	— —	8	6	4	2,5

Tabla 4. Tensión soportada de impulso requerida para equipos.

Se puede comprobar en la **Tabla 4** que existen dos conjuntos de valores bien diferenciados en lo que a tensión nominal de la instalación se refiere, el primero para valores de tensión nominal de 230/400 kV en sistemas trifásicos y 230 kV en sistemas monofásicos, y el segundo para valores de 400/690/1000 kV en sistemas trifásicos.

Vemos que para valores más bajos de tensión nominal de la instalación (230/400 kV), el valor de tensión soportada a impulsos es menor que para valores más altos de tensión nominal de la instalación (400/690/1000 kV). Esto se reflejará a la hora de instalar los dispositivos de protección contra sobretensiones, ya que los dispositivos para los valores de 230/400 kV serán más restrictivos que para los valores de 400/690/100 kV.

3.2 SU8 /CTE – Seguridad frente al riesgo causado por la acción del rayo

Ahora se procederá a analizar y comentar la sección 8 del Documento Básico de Seguridad de Utilización (SU8) del Código Técnico de la edificación (CTE).

3.2.1 Procedimiento de verificación

- *Será necesaria la instalación de un sistema de protección contra el rayo, en los términos que se establecen en el apartado 2, cuando la frecuencia esperada de impactos N_e sea mayor que el riesgo admisible N_a .*

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- *Los edificios en los que se manipulen sustancias tóxicas, radioactivas, altamente inflamables o explosivos y los edificios cuya altura sea superior a 43 m dispondrán siempre de sistemas de protección contra el rayo de eficiencia E superior o igual a 0,98, según lo indicado en el apartado 2.*

Como es evidente, para este tipo de edificios el grado de protección es el más restrictivo de todos.

- *La frecuencia esperada de impactos, N_e , puede determinarse mediante la expresión:*

$$N_e = N_g \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6} \text{ [nº impactos/año]} \quad (\text{Ecuación 2})$$

siendo:

$N_g \rightarrow$ densidad de impactos sobre el terreno (nº impactos/año km²), obtenida según la **Figura 34**;

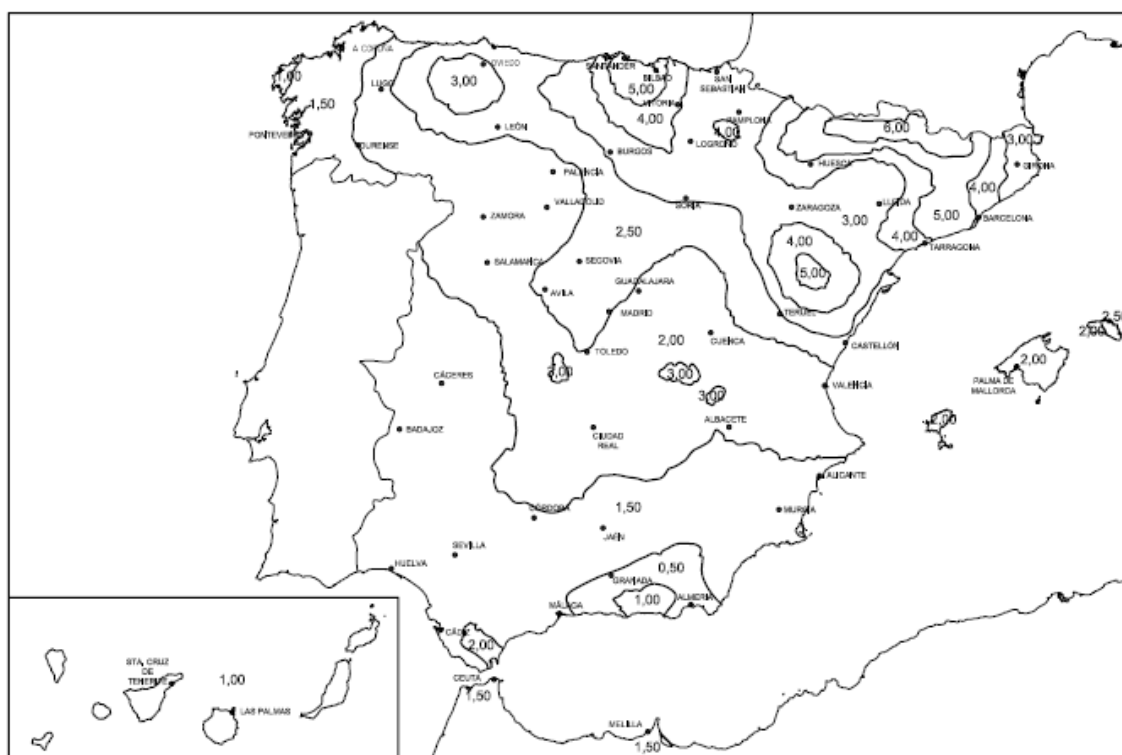


Figura 34. Mapa de densidad de impactos sobre el terreno, N_g

Vemos que hay perfectamente confeccionado un mapa con el nivel cerámico de toda España. Esto ahorra el tener que calcular su valor por otros métodos.

$A_e \rightarrow$ superficie de captura equivalente del edificio aislado en m², que es la delimitada por una línea trazada a una distancia 3H de cada uno de los puntos del perímetro del edificio, siendo H la altura del edificio en el punto del perímetro considerado.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

$C_1 \rightarrow$ coeficiente relacionado con el entorno, según la **Tabla 5**.

Situación del edificio	C_1
Próximo a otros edificios o árboles de la misma altura o más altos	0,5
Rodeado de edificios más bajos	0,75
Aislado	1
Aislado sobre una colina o promontorio	2

Tabla 5. Coeficiente C_1

Sabiendo la superficie de captura equivalente del edificio en m^2 y con la ayuda de la **Tabla 5** con el coeficiente relacionado con el entorno y el mapa de densidad de impactos es muy fácil hallar el valor de la frecuencia esperada de impactos, N_e .

➤ El riesgo admisible, N_a , puede determinarse mediante la expresión:

$$N_a = \frac{5,5}{C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Ecuación 3})$$

siendo:

$C_2 \rightarrow$ coeficiente en función del tipo de construcción, conforme a la **Tabla 6**;

$C_3 \rightarrow$ coeficiente en función del contenido del edificio, conforme a la **Tabla 7**;

$C_4 \rightarrow$ coeficiente en función del uso del edificio, conforme a la **Tabla 8**;

$C_5 \rightarrow$ coeficiente en función de la necesidad de continuidad en las actividades que se desarrollan en el edificio, conforme a la **Tabla 9**.

	Cubierta metálica	Cubierta de hormigón	Cubierta de madera
Estructura metálica	0,5	1	2
Estructura de hormigón	1	1	2,5
Estructura de madera	2	2,5	3

Tabla 6. Coeficiente C_2

Edificio con contenido inflamable	3
Otros contenidos	1

Tabla 7. Coeficiente C_3

Edificios no ocupados normalmente	0,5
Usos Pública Concurrencia, Sanitario, Comercial, Docente	3
Resto de edificios	1

Tabla 8. Coeficiente C_4

Edificios cuyo deterioro pueda interrumpir un servicio imprescindible (hospitales, bomberos, ...) o pueda ocasionar un impacto ambiental grave	5
Resto de edificios	1

Tabla 9. Coeficiente C_5

Gracias a la ayuda de estas tablas con los distintos coeficientes, es bastante fácil hallar el valor total del riesgo admisible N_a . Teniendo ya los dos valores hallados, N_e y N_a , se comparan y si la frecuencia esperada de impactos, N_e , es mayor que el riesgo admisible, N_a , será necesaria la instalación de un sistema de protección contra el rayo que detalla el siguiente punto.

3.2.2 Tipo de instalación exigido

- La eficacia E requerida para una instalación de protección contra el rayo se determina mediante la siguiente fórmula:

$$E = 1 - \frac{N_a}{N_e} \quad (\text{Ecuación 4})$$

- La **Tabla 10** indica el nivel de protección correspondiente a la eficiencia requerida. Las características del sistema para cada nivel de protección se describen en el Anexo SU B:

Eficiencia requerida	Nivel de protección
$E \geq 0,98$	1
$0,95 \leq E < 0,98$	2
$0,80 \leq E < 0,95$	3
$0 \leq E < 0,80$ ⁽¹⁾	4

⁽¹⁾ Dentro de estos límites de eficiencia requerida, la instalación de protección contra el rayo no es obligatoria.

Tabla 10. Componentes de la instalación.

Cuanto mayor sea la diferencia entre los valores N_a y N_e , mayor será la eficiencia requerida, y por tanto más restrictivo será el nivel de protección (por supuesto, siempre y cuando N_e sea mayor que N_a).

3.2.3 Anexo B – Características de las instalaciones de protección frente al rayo

Los sistemas de protección contra el rayo deben constar de un sistema externo, un sistema interno y una red de tierra de acuerdo a los apartados siguientes.

- Sistema externo

El sistema externo de protección contra el rayo está formado por dispositivos captadores y por derivadores o conductores de bajada.

- Diseño de la instalación de dispositivos captadores

Los dispositivos captadores podrán ser puntas Franklin, mallas conductoras y pararrayos con dispositivo de cebado.

Este tipo de dispositivos captadores ya se explicó en el apartado 2.2.1. Protecciones primarias. En cambio si se va a hablar sobre el volumen protegido por estos dispositivos en el siguiente apartado.

✓ Volumen protegido mediante puntas Franklin y mallas conductoras

El diseño de la instalación se hará de manera que, en función del nivel de protección requerido, el edificio quede dentro del volumen protegido determinado por alguno de los siguientes métodos, que pueden utilizarse de forma separada o combinada:

- a) ángulo de protección;
- b) esfera rodante;
- c) mallado o retícula.

a) Método del ángulo de protección

El volumen protegido determinado por los dispositivos captadores está formado por la superficie de referencia y la superficie generada por una línea que, pasando por el extremo del dispositivo captador, gire formando un ángulo α con él. Los valores de los ángulos de protección α vienen dados en la **Tabla 11** en función de la diferencia de altura entre la punta del pararrayos y el plano horizontal considerado h , para cada nivel de protección. Cuando se disponga un conductor horizontal uniendo dos puntas, el volumen protegido será el resultante de desplazar a lo largo del conductor el definido por las puntas (véase **Figura 35**).

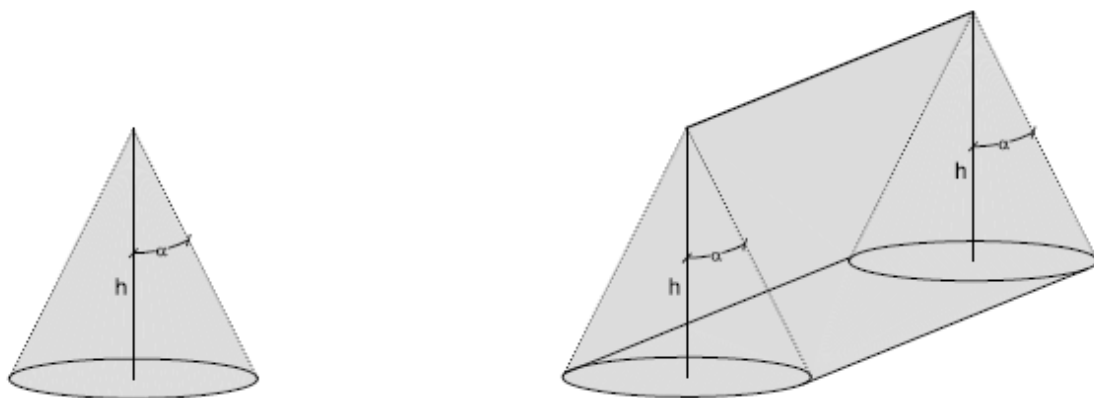


Figura 35. Volumen protegido por captadores.

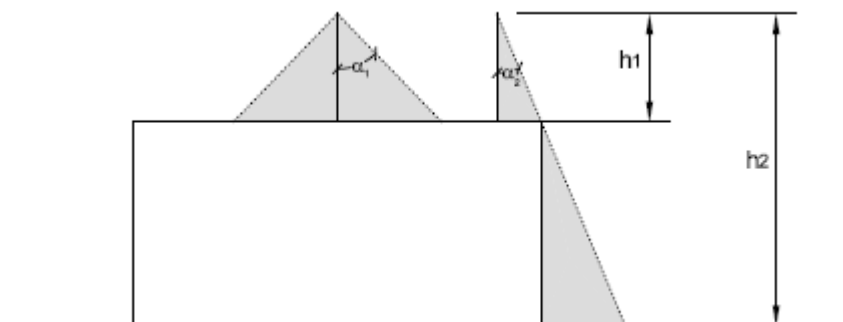


Figura 36. Ángulo de protección, disposición para diferentes alturas.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

Nivel de protección	Diferencia de altura h entre la punta del pararrayos y el plano horizontal considerado			
	20	30	45	60
1	25°	*	*	*
2	35°	25°	*	*
3	45°	35°	25°	*
4	55°	45°	35°	25°

* En estos casos se emplean los métodos de esfera rodante y/o malla.

Tabla 11. Ángulo de protección α

La mejor opción para que el volumen protegido sea el máximo es colocar dos puntas y unir las mediante un conductor horizontal. De esa manera se consigue abarcar un volumen bastante elevado.

Vemos también que para determinadas diferencias de altura h no existe ángulo de protección α y se tienen que usar los métodos de esfera rodante y/o malla.

También se puede comprobar como para un nivel de protección muy restrictivo como el nivel 1, el valor del ángulo de protección es muy bajo, por lo que se necesitarían un mayor número de dispositivos captadores para poder proteger la instalación.

Este método se usa básicamente para estructuras simples y pequeñas.

b) Método de la esfera rodante

El volumen protegido queda definido al hacer rodar una esfera de radio R sobre el edificio (véase **Figura 37**). Las zonas que puedan ser tocadas por la esfera son susceptibles de ser alcanzados por las descargas.

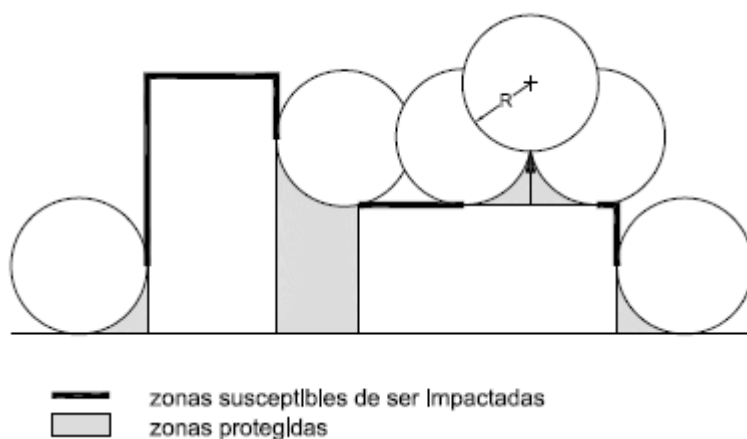


Figura 37. Esfera rodante en estructuras.

El radio de la esfera será el indicado en la **Tabla 12** en función del nivel de protección.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

Nivel de protección	Radio de la esfera rodante m
1	20
2	30
3	45
4	60

Tabla 12. Radio de la esfera rodante.

Este método es utilizado para estructuras complejas y más altas, debido a que protege un mayor valor de volumen.

c) Método de la malla

*El volumen protegido es el definido por una malla rectangular cuya dimensión mayor será la indicada en la **Tabla 13** en función del nivel de protección.*

Nivel de protección	Dimensión de la retícula m
1	5
2	10
3	15
4	20

Tabla 13. Dimensión de la retícula.

Cuanto menor es el nivel de protección, menor es la dimensión del espacio a proteger, y por lo tanto se necesitará un mayor número de dispositivos captadores para proteger la instalación.

Las condiciones para que la protección sea efectiva son las siguientes:

- *los conductores captadores situados en la cubierta deben estar colocados en:*
 - i) el perímetro de la cubierta;*
 - ii) en la superficie de la cubierta formando una malla de la dimensión exigida;*
 - iii) en la línea de limateza de la cubierta, cuando la pendiente de la cubierta sea superior al 10%;*
- *en las superficies laterales de la estructura la malla debe disponerse a alturas superiores al radio de la esfera rodante correspondiente al nivel de protección exigido;*
- *ninguna instalación metálica debe sobresalir fuera del volumen protegido por las mallas.*

En edificios de altura superior a 60 m protegidos mediante malla conductora, se deberá disponer también una malla conductora para proteger el 20% superior de la fachada.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

✓ Volumen protegido mediante pararrayos con dispositivo de cebado

Los pararrayos con dispositivo de cebado (PDC) son el sistema de protección exterior más eficaz, ya que puede garantizar un radio de protección variable en función de su avance de cebado.

Su funcionamiento se basa en la emisión de una señal de alta tensión de amplitud y frecuencia determinada y controlada. Se forma un trazador ascendente que se propaga de manera continua hacia el trazador descendente del rayo, consiguiendo elevar el punto de impacto de la descarga por encima de la estructura protegida.

Una de las ventajas de este sistema frente a un sistema de captación pasivo o convencional es la de proteger grandes áreas, que los sistemas convencionales no tendrían alcance para proteger, como por ejemplo, áreas abiertas, zonas deportivas, etc.

*Cuando se utilicen pararrayos con dispositivo de cebado, el volumen protegido por cada punta se define de la siguiente forma (véase **Figura 38**):*

- a) *bajo el plano horizontal situado 5 m por debajo de la punta, el volumen protegido es el de una esfera cuyo centro se sitúa en la vertical de la punta a una distancia D y cuyo radio es:*

$$R = D + \Delta L \quad (\text{Ecuación 5})$$

siendo:

R → el radio de la esfera en m que define la zona protegida

D → distancia en m que figura en la **Tabla 14** en función del nivel de protección

ΔL → distancia en m función del tiempo del avance en el cebado Δt del pararrayos en μs . Se adoptará $\Delta L = \Delta t$ para valores de Δt inferiores o iguales a 60 μs , y $\Delta L = 60$ m para valores de Δt superiores.

Nivel de protección	Distancia D m
1	20
2	30
3	45
4	60

Tabla 14. Distancia D

- b) *por encima de este plano, el volumen protegido es el de un cono definido por la punta de captación y el círculo de intersección entre este plano y la esfera.*

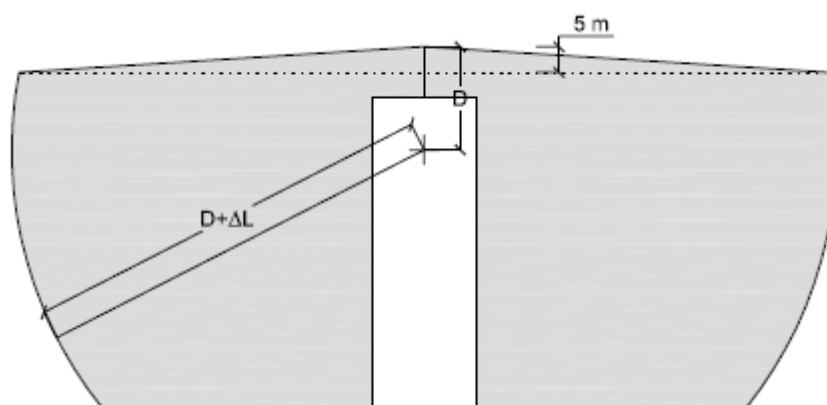


Figura 38. Volumen protegido por pararrayos con dispositivo de cebado.

○ *Derivadores o conductores de bajada*

Los derivadores conducirán la corriente de descarga atmosférica desde el dispositivo captador a la toma de tierra, sin calentamientos y sin elevaciones de potencial peligroso, por lo que deben preverse:

- a) al menos un conductor de bajada por cada punta Franklin o pararrayos con dispositivo de cebado, y un mínimo de dos cuando la proyección horizontal del conductor sea superior a su proyección vertical o cuando la altura de la estructura que se protege sea mayor que 28 m;
- b) longitudes de las trayectoria lo más reducidas posible;
- c) conexiones equipotenciales entre los derivadores a nivel del suelo y cada 20 metros.

En caso de mallas, los derivadores y conductores de bajada se repartirán a lo largo del perímetro del espacio a proteger, de forma que su separación media no exceda de lo indicado en la **Tabla 15** en función del nivel de protección.

Nivel de protección	Distancia entre conductores de bajada m
1	10
2	15
3	20
4	25

Tabla 15. Distancia entre conductores de bajada en sistemas de protección de mallas conductoras.

Es evidente, que cuanto más restrictivo sea el nivel de protección de la instalación, más pequeña tendrá que ser la distancia entre conductores de bajada.

Todo elemento de la instalación discurrirá por donde no represente riesgo de electrocución o estará protegido adecuadamente.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

➤ Sistema interno

Este sistema comprende los dispositivos que reducen los efectos eléctricos y magnéticos de la corriente de la descarga atmosférica dentro del espacio a proteger.

Deberá unirse la estructura metálica del edificio, la instalación metálica, los elementos conductores externos, los circuitos eléctricos y de telecomunicación del espacio a proteger y el sistema externo de protección si lo hubiera, con conductores de equipotencialidad o protectores de sobretensiones a la red de tierra.

Cuando no pueda realizarse la unión equipotencial de algún elemento conductor, los conductores de bajada se dispondrán a una distancia de dicho elemento superior a la distancia de seguridad d_s . La distancia de seguridad d_s será igual a:

$$d_s = 0,1 \cdot L \quad \text{(Ecuación 6)}$$

siendo:

$L \rightarrow$ la distancia vertical desde el punto en que se considera la proximidad hasta la toma de tierra de la masa metálica o la unión equipotencial más próxima. En el caso de canalizaciones exteriores de gas, la distancia de seguridad será de 5 m como mínimo.

➤ Red de tierra

La red de tierra será la adecuada para dispersar en el terreno la corriente de las descargas atmosféricas.

4. Normativa e instalaciones en Polonia

La normativa polaca contemplada para las sobretensiones transitorias se rige por la normativa europea y por la normativa internacional. Los documentos existentes en Polonia son el PN-IEC 60364-4-44:1999 y el PN-EN 62305:2006 en sus cuatro partes (PN-EN 62305-1, PN-EN 62305-2, PN-EN 62305-3, PN-EN 62305-4).

El documento PN-IEC 60364-4-44:1999 es extraído de la normativa internacional (IEC, International Electrotechnical Commission), el cual es traducido y adaptado para Polonia.

Los documentos PN-EN 62305:2006 (PN-EN 62305-1, PN-EN 62305-2, PN-EN 62305-3, PN-EN 62305-4) son extraídos de la normativa europea (CENELEC, European Committee for Electrotechnical Standardization), los cuales son traducidos y adaptados para Polonia.

El primer documento, el PN-IEC 60364-4-44:1999 trata sobre la protección frente a las perturbaciones de tensión y las perturbaciones electromagnéticas.

El segundo documento, el PN-EN 62305:2006 trata sobre la protección frente a sobretensiones de tipo rayo. Dentro de este documento, la parte 1 hace mención sobre los principios generales, la parte 2 sobre la gestión de riesgos, la parte 3 sobre los daños físicos a las estructuras y riesgos en las personas, y la parte 4 sobre sistemas eléctricos y electrónicos dentro de las estructuras.

Todos estos documentos son muy extensos, aparte de que algunos incluyen información no relevante para este tema en concreto, por lo que se procederá a comentar los contenidos más importantes de ambos documentos.

4.1 PN-IEC 60364-4-44:1999

- *Generalidades*

En general las sobretensiones por maniobra son menores que las sobretensiones de origen atmosférico y por tanto los requisitos respecto a la protección contra sobretensiones de origen atmosférico normalmente cubren la protección contra sobretensiones por maniobras.

Este capítulo no se aplica en caso de sobretensiones debidas a rayos directos o cercanos. Para protección contra sobretensiones transitorias debidas a rayos directos, se aplican las series de Normas PN-IEC 61024, PN-IEC 61312 e IEC 61662.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

Respecto a las Normas PN-IEC 61024, PN-IEC 61312 e IEC 61662; se creó la Norma PN-EN 62305:2006 que incluye la suma de estas tres últimas. Los documentos que teníamos hasta el momento eran:

PN-IEC 61024	PN-IEC 61312	IEC 61662
PN-IEC 61024-1	PN-IEC 61312-1	IEC 61662
PN-IEC 61024-1-1	PN-IEC 61312-2	
PN-IEC 61024-1-2	PN-IEC 61312-3	
	PN-IEC 61312-4	
	PN-IEC 61312-5	

Con la creación de la Norma PN-EN 62305:2006, la distribución de las tres normas anteriores quedó de la siguiente manera:

PN-EN 62305-1	PN-EN 62305-2	PN-EN 62305-3	PN-EN 62305-4
PN-IEC 61024-1	IEC 61662	PN-IEC 61024-1	PN-IEC 61312-1
PN-IEC 61024-1-1		PN-IEC 61024-1-2	PN-IEC 61312-2
PN-IEC 61312-1			PN-IEC 61312-3
IEC 61662			PN-IEC 61312-4
			PN-IEC 61312-5

Después de esta reestructuración, en Polonia se retiraron las Normas PN-IEC 61024, PN-IEC 61312 e IEC 61662 en enero de 2009.

- *Descripción de las categorías de impulso soportado*

Los equipos con una tensión soportada de impulso correspondiente a la categoría IV de sobretensión son adecuados para su uso en, o en la proximidad de, el origen de las instalaciones eléctricas, por ejemplo aguas arriba del panel de distribución principal. Los equipos con categoría IV tienen una muy elevada capacidad de resistencia a los impulsos proporcionando el requerido nivel de fiabilidad alto.

NOTA 1. Son ejemplos de tales equipos los contadores eléctricos, dispositivos de protección contra sobretensiones entrantes y unidades de control de onda.

Los equipos con una tensión soportada de impulso correspondiente a la categoría III de sobretensión son de uso en instalaciones fijas aguas abajo, incluyendo el panel de distribución principal, proporcionando un elevado grado de disponibilidad.

NOTA 2. Son ejemplos de tales equipos los paneles de distribución, interruptores automáticos, sistemas de cableado en la instalación fija, y equipos de utilización industrial y algunos otros equipos, por ejemplo, motores estacionarios con conexión permanente a la instalación fija.

Los equipos con una tensión soportada de impulso correspondiente a categoría II de sobretensión son adecuados para conexión a instalaciones eléctricas fijas,

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

proporcionando un grado normal de disponibilidad normalmente requerido para equipos que utilizan corriente.

NOTA 3. Son ejemplos de estos equipos los electrodomésticos, herramientas portátiles y cargas similares. Ordenadores, aparatos de audio y video, y otros sistemas electrónicos pueden ser sensibles a sobretensiones transitorias y/o temporales de menos de 2,5 kV entre fases, debido a protecciones internas o dispositivos de filtro.

Los equipos con una tensión soportada de impulso correspondiente a categoría I de sobretensión sólo son adecuados para su uso en las instalaciones fijas de edificios donde existen dispositivos de protección fuera del equipo – para limitar sobretensiones transitorias al nivel especificado.

NOTA 4. Ejemplos de tales equipos son aquellos aparatos electrodomésticos con circuitos electrónicos que son muy sensibles respecto a las sobretensiones.

Los equipos con una tensión soportada de impulso correspondiente a categoría I de sobretensión no deben estar directamente conectados a la red eléctrica pública.

Es apreciable que este punto es casi idéntico al apartado 3.1.2 de este proyecto (Categoría de las sobretensiones, del ITC-BT-23 del REBT). Solo cambia el orden de definición de las categorías, y la forma de expresarlas.

- *Control inherente de la sobretensión*

*Cuando una instalación es alimentada por un sistema de baja tensión totalmente enterrado y no tiene líneas aéreas, la tensión soportada de impulso del equipo de acuerdo con la **Tabla 16** es suficiente y no se precisa protección específica contra sobretensiones atmosféricas.*

Cuando una instalación es alimentada por, o incluye, una línea aérea de baja tensión y el nivel cerámico es menor o igual a 25 días al año (AQ 1), no se requiere una protección específica contra sobretensiones de origen atmosférico.

Este apartado también tiene uno equivalente en el ITC-BT-23 del REBT (apartado 3.1.3 de este proyecto), en el apartado de Medidas para el control de las sobretensiones, más concretamente en la definición de Situación natural.

La única diferencia apreciable es que en la normativa polaca se especifica el nivel cerámico de 25 días al año (AQ 1) para detallar que con un valor igual o menor a ése, no se requiere una protección específica contra sobretensiones de origen atmosférico en línea aérea de baja tensión. En cambio en la normativa española no especifica ningún valor, solamente detalla que en una línea aérea constituida por conductores aislados con pantalla metálica unida a tierra por sus dos extremos, no es necesaria una protección contra sobretensiones de origen atmosférico.

- *Control de protección de sobretensión basado en condiciones de influencias externas*

*Cuando una instalación está alimentada por, o contiene, una línea aérea, y el nivel cerámico del emplazamiento es mayor de 25 días al año (AQ 2), se precisa protección contra sobretensiones de origen atmosférico. El nivel de protección del dispositivo de protección no debe ser superior al nivel de la categoría II de sobretensión, dado en la **Tabla 16**.*

NOTA 1. El nivel de sobretensión puede controlarse por dispositivos de protección de descargas aplicados cerca del origen de la instalación, o bien en las líneas aéreas o en la instalación del edificio.

Este apartado también tiene uno equivalente en el ITC-BT-23 del REBT (apartado 3.1.3 de este proyecto), en el apartado de Medidas para el control de las sobretensiones, más concretamente en la definición de Situación controlada.

La única diferencia apreciable es que en la normativa polaca se especifica el nivel cerámico de 25 días al año (AQ 1) para detallar que con un valor mayor a éste, se precisa protección contra sobretensiones de origen atmosférico en línea aérea. En cambio en la normativa española no especifica ningún valor, solamente detalla que cuando una instalación se alimenta por una línea aérea con conductores desnudos o aislados es condición necesaria para la protección contra sobretensiones de origen atmosférico.

NOTA 2. De acuerdo con la Norma IEC 61024-1, 25 días de tormenta al año son equivalentes a un valor de 2,24 rayos por km² y año. Esto se obtiene de la fórmula:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,25} \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde:

N_g es la frecuencia de rayos por km² y año

T_d es el número de días de tormenta al año (nivel cerámico)

Encontramos algo parecido a la NOTA 2 de este apartado en la sección 8 del Documento Básico de Seguridad de Utilización del CTE (apartado 3.2.1 de este proyecto).

Pero aquí si vemos una gran diferencia; en la normativa polaca para obtener la frecuencia de rayos por km² y año (N_g) te dan una fórmula (**Ecuación 7**), por lo que dependiendo del lugar que se encuentre la instalación a proteger en Polonia, habrá que obtener el correspondiente valor de N_g. En cambio en España el valor de N_g ya nos lo dan obtenido en forma de mapa gracias a los estudios realizados en cuanto a números de días de tormenta al año en cada zona de España.

- *Control de protección de sobretensión basado en evaluación de riesgo*

Los siguientes son diferentes niveles de importancia de protección:

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- a) consecuencias relacionadas con la vida humana, por ejemplo servicios de seguridad, equipos médicos en hospitales;
- b) consecuencias en los servicios públicos, por ejemplo pérdida de servicios públicos, centros IT, museos;
- c) consecuencias en la actividad industrial o comercial, por ejemplo hoteles, bancos, industrias, mercados, granjas;
- d) consecuencias en grupos de individuos, por ejemplo grandes edificios residenciales, iglesias, oficinas, colegios;
- e) consecuencias en individuos, por ejemplo edificios pequeños o medianos, pequeñas oficinas.

Para los niveles de importancia del a) al c) debe proporcionarse protección contra sobretensión.

Para los niveles de importancia d) a e) los requisitos de protección dependen del resultado del cálculo. El cálculo debe realizarse utilizando la fórmula del Anexo B para la determinación de la longitud d , que está basada en una convención y se llama longitud convencional.

Se requiere protección si:

$$d > d_c \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde:

d es la longitud convencional en km de línea de alimentación de la estructura considerada con un valor máximo de 1 km;

d_c es la longitud crítica en km, es igual a $1/N_g$ para los niveles de importancia d) e igual a $2/N_g$ para los niveles de importancia e) donde N_g es la frecuencia de rayos por km^2 por año.

Si este cálculo indica que se requiere un dispositivo de protección de descargas, el nivel de protección de estos dispositivos de protección no debe ser mayor que el nivel de categoría II de sobretensión, dado en la **Tabla 16**.

- Anexo B - Determinación de la longitud convencional, d

La configuración de la línea de distribución de baja tensión, su puesta a tierra, nivel de aislamiento y los fenómenos considerados (acoplamiento inducido, acoplamiento resistivo) conducen a diferentes elecciones de d . La determinación propuesta a continuación representa, por convención, el peor caso:

$$d = d_1 + d_2/k_g + d_3/k_t \quad (\text{Ecuación 9})$$

Por convención d está limitada a 1km,

donde

d_1 es la longitud de la línea aérea de baja tensión de alimentación a la estructura, limitado a 1 km;

d_2 es la longitud de la línea subterránea de baja tensión no apantallada a la estructura, limitado a 1 km;

d_3 es la longitud de la línea aérea de alta tensión de alimentación a la estructura, limitado a 1 km;

La longitud de la línea subterránea de alta tensión es despreciada.

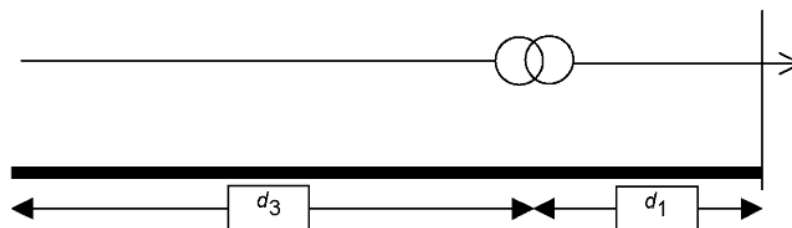
La longitud de la línea subterránea apantallada de baja tensión es despreciada.

$K_g = 4$, es el factor de reducción basado en la relación de la influencia de descargas entre las líneas aéreas y los cables enterrados no apantallados, calculado para una resistividad del suelo de 250 Ωm ;

$K_t = 4$, es el factor de reducción típico para un transformador.

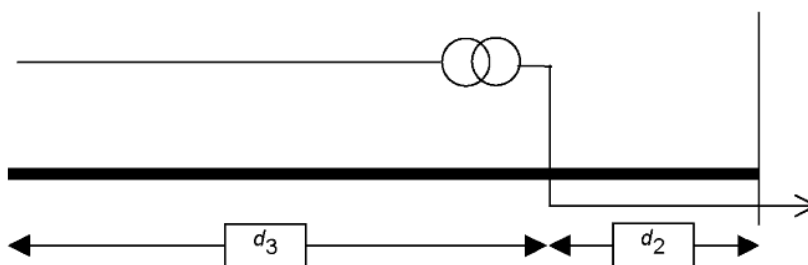
Para este apartado de la normativa polaca no existe ninguno análogo en la normativa española. A continuación hay un ejemplo de ayuda del Anexo B – Determinación de la longitud convencional, d. Un ejemplo de cómo aplicar d_1 , d_2 y d_3 para la determinación de d.

Líneas aéreas de AT y BT



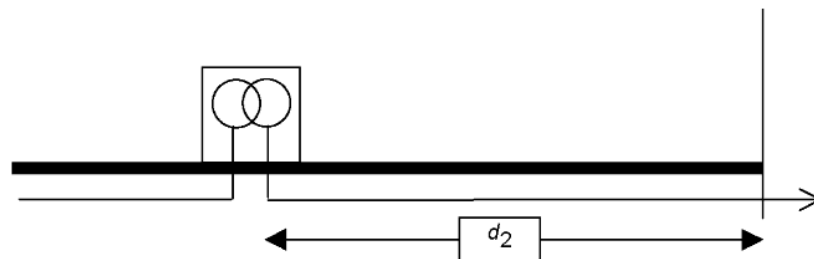
$$d = d_1 + \frac{d_3}{K_t}$$

Línea aérea de AT y líneas subterráneas de BT



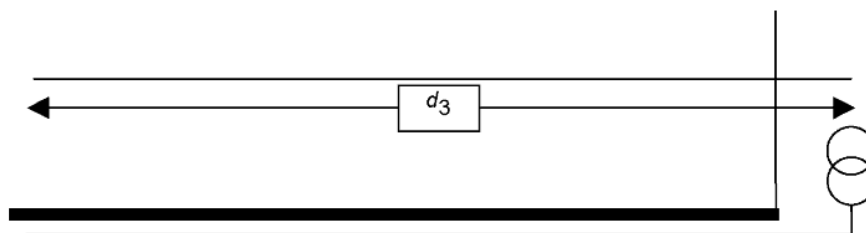
$$d = \frac{d_3}{K_t} + \frac{d_2}{K_g}$$

Líneas subterráneas de AT y BT



$$d = \frac{d_2}{K_g}$$

Línea aérea de AT



$$d = \frac{d_3}{K_t}$$

Cuando el transformador AT/BT está dentro del edificio $d_1 = d_2 = 0$.

Ejemplos de cómo aplicar d_1 , d_2 y d_3 para la determinación de d

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- *Tensión soportada de impulso requerida de equipos*

*Los equipos deben seleccionarse de forma que la tensión soportada de impulso no sea menor que la tensión soportada de impulso requerida especificada en la **Tabla 16**.*

Znamionowe napięcie instalacji* V		Wymagane napięcie udarowe wytrzymywane dla kV			
Sieć trójfazowa**	Sieć jednofazowa z punktem środkowym ^{N4)}	Urządzeń w/przy złączu instalacji (wytrzymałość udarowa kategorii IV)	Urządzeń roz- dzielczych i obwodów odbior- czych (wytrzy- małość udarowa kategorii III)	Odbiorników (wytrzymałość udarowa kategorii II)	Urządzeń specjalnie chronionych (wytrzymałość udarowa kategorii I)
–	120-240	4	2,5	1,5	0,8
230/400** 277/480**	–	6	4	2,5	1,5
400/690	–	8	6	4	2,5
1 000	–	Wartości uzależnione od konstrukcji sieci			
* Zgodnie z normą IEC 38.					
** W Kanadzie i USA dla napięć fazowych wyższych niż 300 V, wartość napięcia wytrzymałości udarowej odpowiada następnemu wyższemu poziomowi podanemu w kolumnie.					
Kategoria I dotyczy konstruowania specjalnych urządzeń. Kategoria II jest adresowana do komitetów opracowujących normy wyrobów, stanowiących urządzenia dołączane do sieci zasilającej. Kategoria III jest adresowana do komitetów opracowujących normy wyrobów w odniesieniu do materiałów instalacyjnych oraz dla wyrobów specjalnych. Kategoria IV jest adresowana do zakładów energetycznych i dozoru technicznego. (patrz również 443.2.2).					

Tabla 16. Tensión soportada a impulsos requerida para soportar equipos.

Este punto es análogo al apartado Selección de los materiales en la instalación del ITC-BT-23 del REBT (apartado 3.1.4 de este proyecto).

La diferencia existente entre ambas normativas es la **Tabla 4** y **Tabla 16**. Podemos ver que en la **Tabla 4** referente al REBT solo se hace referencia a dos tipos de tensiones: 230/400V trifásicos y 230V monofásicos; y 400/690/1000V trifásicos, en cambio en el documento polaco vemos en la **Tabla 16** que se hace referencia a cuatro tipos de tensiones diferentes: 120/240V monofásicos; 230/400V (277/480V) trifásicos; 400/690V trifásicos; y 1000V trifásicos. Aunque se puede apreciar que los valores de tensión de impulso requerida para valores de 230/400V y 400/690V son iguales para las dos normativas.

También se puede apreciar que en la **Tabla 16**, para el valor de 1000V no especifican ningún valor de tensión soportada de impulso requerida. Solamente se indica que ese valor depende de la estructura de la red y del ingeniero correspondiente.

4.2 PN-EN-62305:2006

En este apartado nos encontramos con la norma polaca más actual en lo que a sobretensiones de tipo rayo se refiere, ya que fue aprobada en el año 2006. Además también es la norma más extensa y amplia para la protección contra sobretensiones de tipo rayo, ya que dispone de mucha información relativa al tema en cuestión.

- *Fuentes y tipos de daño a un servicio*

La corriente del rayo es la fuente de daño. Las siguientes situaciones se tendrán en cuenta, dependiendo de la posición del punto del alcance del rayo en relación con el servicio considerado:

- S1: rayos en la estructura;
- S2: rayos cerca de la estructura;
- S3: rayos en los servicios conectados a la estructura;
- S4: rayos cerca de los servicios conectados a la estructura.

Como resultado, el rayo puede causar tres tipos básicos de daño:

- D1: lesión de los seres vivos, debido a tensiones de contacto y de paso;
- D2: daños físicos (incendio, explosión, destrucción mecánica, emisiones químicas), debido a efectos térmicos de la corriente del rayo;
- D3: fallo de sistemas eléctricos y electrónicos, debido a sobretensiones.

Cada tipo de daño, solo o en combinación con otros, puede producir diferentes pérdidas en el objeto a proteger. El tipo de pérdida que puede aparecer depende sobre las características del objeto mismo.

A los efectos de esta norma los siguientes tipos de pérdidas se consideran:

- L1: pérdida de vidas humanas;
- L2: pérdida de servicio al público;
- L3: pérdida del patrimonio cultural;
- L4: pérdida de valor económico (estructura y su contenido, el servicio y la pérdida de actividad).

La pérdida de tipo L1, L2 y L3 se puede considerar como la pérdida de valores sociales, mientras que la pérdida de tipo L4 puede ser considerado como puramente pérdidas económicas.

*La relación entre las fuentes de daño, tipos de daño y pérdidas se expresan en la **Tabla 17** para estructuras y en la **Tabla 18** para servicios.*

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

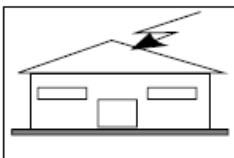
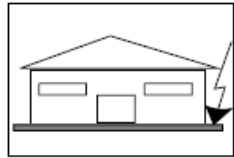
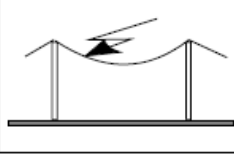
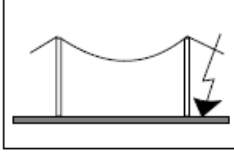
Point of strike	Source of damage	Structure		Service	
		Type of damage	Type of loss	Type of damage	Type of loss
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ⁽²⁾ L1, L2, L3, L4 L1 ⁽¹⁾ , L2, L4	D2 D3	L'2, L'4 L'2, L'4
	S2	D3	L1 ⁽¹⁾ , L2, L4		
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ⁽²⁾ L1, L2, L3, L4 L1 ⁽¹⁾ , L2, L4	D2 D3	L'2, L'4 L'2, L'4
	S4	D3	L1 ⁽¹⁾ , L2, L4	D3	L'2, L'4
(1) Only for structures with risk of explosion, and for hospitals or other structures where failures of internal systems immediately endangers human life. (2) Only for properties where animals may be lost.					

Tabla 17. Daños y pérdidas en estructuras en función de diferentes puntos de ataque del rayo.

Point of strike	Source of damage	Type of damage	Type of loss
Service	S3	D2 D3	L2, L4
Near the service	S4	D3	
Supplied structure	S1	D2 D3	

Tabla 18. Daños y pérdidas de servicios en función de diferentes puntos de ataque del rayo.

De este apartado no tenemos ninguno análogo en nuestra normativa. En él se puede apreciar que hay una clasificación de las situaciones, daños y pérdidas en todo lo referente al ataque del rayo en estructuras y servicios.

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

- *Sistema externo de protección contra el rayo*

Los dispositivos captadores instalados en una estructura se encuentran localizados en las esquinas, puntos expuestos y bordes (especialmente en el nivel superior de cualquier fachada), de conformidad con uno o varios de los métodos siguientes.

Los métodos aceptados para ser utilizados en la determinación de la posición de los captadores son:

- *El método del ángulo de protección;*
- *El método de la esfera rodante;*
- *El método de la malla.*

El método de esfera rodante es conveniente en todos los casos.

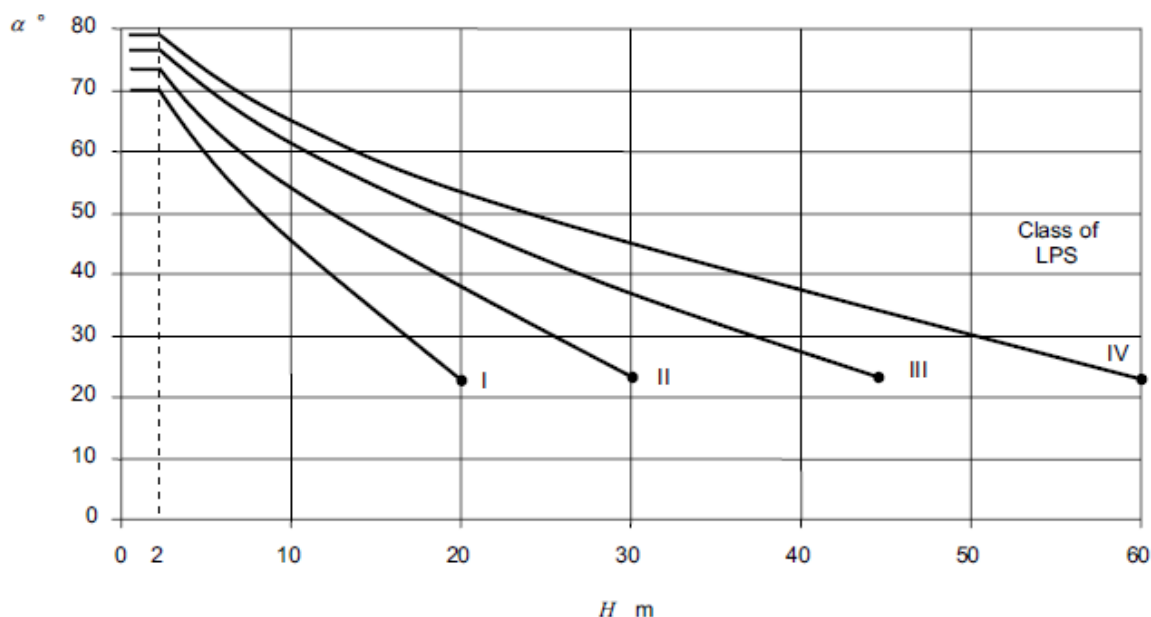
*El método del ángulo de protección es adecuado para los edificios de forma de simple, pero está sujeto a límites de altura de los captadores indicada en la **Tabla 19**.*

El método de la malla es una forma de protección adecuada en edificios con superficies planas.

*Los valores para el ángulo de protección, el radio de esfera rodante y el tamaño de malla para cada clase de LPS (sistema de protección contra el rayo) figuran en la **Tabla 19**.*

Class of LPS	Protection method		
	Rolling sphere radius r m	Mesh size W m	Protection angle α°
I	20	5 × 5	See figure below
II	30	10 × 10	
III	45	15 × 15	
IV	60	20 × 20	

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA



NOTE 1 Not applicable beyond the values marked with •.

Only rolling sphere and mesh methods apply in these cases.

NOTE 2 H is the height of air-termination above the reference plane of the area to be protected.

NOTE 3 The angle will not change for values of H below 2 m.

Tabla 19. Valores máximos para el radio de esfera rodante, tamaño de malla y ángulo de protección correspondiente a la clase de LPS.

Encontramos algo parecido a este apartado en el Anexo B del Documento Básico de Seguridad de Utilización del CTE (apartado 3.2.3 de este proyecto).

Las diferencias aquí las encontramos en la **Tabla 11** y la **Tabla 19**, referentes al ángulo de protección con respecto a la altura. Vemos que en la **Tabla 11** de la normativa española los valores vienen indicados para cuatro valores de altura (20, 30, 45 y 60 m), y a la hora de calcular algún ángulo de protección diferente a esa altura es complicado. En cambio en la **Tabla 19** de la normativa polaca tenemos un gráfico en el que se puede ver el ángulo de protección para los valores intermedios de altura, sin necesidad de tener que calcular ningún valor.

Referente a los demás valores de protección en los otros dos métodos (método de la esfera rodante y método de la malla), se puede comprobar que son iguales, y no hay ninguna diferencia entre normativa española y polaca.

5. Conclusiones

Después de haber hecho la comparativa entre la normativa española y la normativa polaca, podemos comprobar a simple vista que las dos normativas son adaptadas en mayor o menos medida de la normativa internacional y/o europea.

Como miembros de la Unión Europea (UE), tanto España como Polonia, tienen que trasponer a sus normativas las directrices establecidas por la UE en los aspectos relacionados con la calidad y la seguridad eléctrica.

Como se puede comprobar en la página de la Comisión Electrotécnica Internacional (www.iec.ch), la IEC cuenta con 59 miembros, cada uno de ellos representando a un país, y que en conjunto representan el 95% de la energía eléctrica del mundo. Esta Comisión Electrotécnica Internacional se creó en 1904, y cuenta con España y Polonia como miembros de la Comisión.

En segundo lugar, mirando en la página del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (www.cenelec.eu), se puede comprobar que el CENELEC cuenta con 31 países europeos, en los que se encuentran España y Polonia. El CENELEC se creó en 1973, y contó con la unión de España en el año 1977, y la adhesión de Polonia en el año 2004.

La normativa europea en los últimos años se está desarrollando en paralelo con la normativa internacional, con muy pocas diferencias entre ellas. Si a eso le sumas que España y Polonia son miembros de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC), es de prever que las normativas sean muy parecidas en cuanto a sobretensiones transitorias se refiere.

Finalmente, comentar que las dos normativas españolas referentes a sobretensiones transitorias (ITC-23/REBT, SU8/CTE) son Reales Decretos, es decir, son de obligado cumplimiento ya que es una norma jurídica. En cambio las normativas polacas referentes a sobretensiones transitorias (PN-IEC 60364-4-44:1999 y el PN-EN 62305:2006) no están legalizadas, por lo que solo son normas, y éstas como tal no son de obligado cumplimiento. El uso de normas es voluntario, pero la responsabilidad cae sobre el ingeniero que diseñe la instalación, por lo que se suele respetar estas normas.

Otra diferencia entre normativas es que Polonia se ha limitado a traducir las Normas IEC 60364-4-44 y EN 62305 al polaco, sin diferencia alguna entre las normativas internacionales/europeas y polacas. Es un punto a favor en cuanto a que la normativa internacional/europea es muy extensa y abarca muchos más temas relacionados con las sobretensiones transitorias. Pero un punto en contra es que no ha adaptado nada a los valores nacionales (como por ejemplo la **Figura 34**, en la que en la normativa española el valor de la densidad de impactos sobre el terreno, N_g , está hallado para cualquier punto del territorio español en forma de mapa, de cuya normativa polaca carece).

ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN ESPAÑA Y POLONIA

La normativa española ha sido mejor adaptada, ya que no solo se ha limitado a traducir de la normativa internacional/europea, sino que ha adaptado todo a los valores nacionales. También se ha limitado a incluir los puntos más importantes y de obligado cumplimiento, sin incluir documentación no relevante.

6. Bibliografía y referencias

- ITC N°23 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (Real Decreto 842/2002).
- Sección 8 del Documento Básico de Seguridad de Utilización (SU8) del Código Técnico de la edificación (CTE) (Real Decreto 984/2009).
- Documento polaco PN-IEC-60364-4-443:1999.
- Documento polaco PN-EN-62305:2006 en sus cuatro partes (PN-EN-62305-1, PN-EN-62305-2, PN-EN-62305-3, PN-EN-62305-4).
- Guía 07/08 de Protección contra Sobretensiones Transitorias en Baja Tensión de la compañía Schneider Electric.
- <http://www.pkn.pl> – Página web del Comité Polaco de Estandarización.
- <http://www.ise.pl> – Página web de una comunidad electricista polaca.
- <http://www.iec.ch> – Página web de la Comisión Electrotécnica Internacional.
- <http://www.cenelec.eu> – Página web del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.
- <http://www.pwr.wroc.pl> – Página web de la Universidad Politechnika Wroclawska.